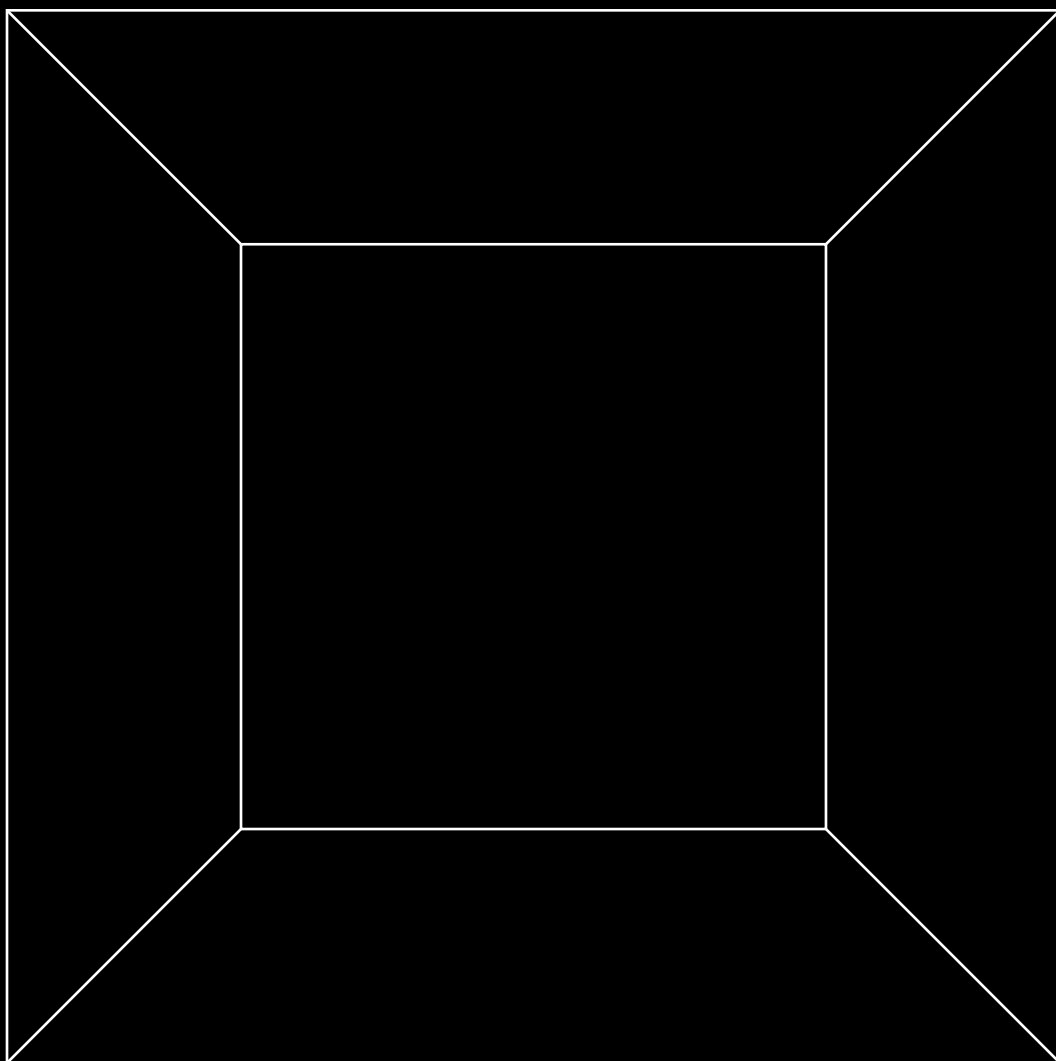


Monografie Politechniki Łódzkiej

Metoda strumieniowego mapowania fotonowego

Krzysztof Guzek



Metoda strumieniowego mapowania fotonowego

Krzysztof Guzek

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Ewa Napieralska-Juszczak
dr hab. inż. Adam Wojciechowski

Redaktor Naukowy Wydziału Fizyki Technicznej,
Informatyki i Matematyki Stosowanej:
dr hab. inż. Aneta Poniszewska-Marańda

© Copyright by Politechnika Łódzka 2016

Projekt okładki
dr inż. Krzysztof Guzek

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel. 42-631-20-87, 42-631-29-52
fax 42-631-25-38
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISBN 978-83-7283-889-6

Reprodukcja z materiałów dostarczonych przez Autorów

Nakład 50 egz. Ark. wyd. 11,0. Ark. druk. 11,0. Papier offset. 80 g, 70 x 100
Wykonano w Drukarni „Quick-Druk” s.c. 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11
Nr 2244

Spis treści

1.	Wprowadzenie	7
1.1.	Wstęp	7
1.2.	Globalny model oświetlenia.	10
1.3.	Układ książki	12
1.4.	Wykaz oznaczeń.	13
2.	Światło i materia	15
2.1.	Dualizm korpuskularno-falowy światła	15
2.2.	Optyka geometryczna	16
2.2.1.	Odbicie zwierciadlane	17
2.2.2.	Odbicie rozproszone	18
2.2.3.	Refrakcja	19
2.2.4.	Kaustyka	21
2.3.	Radiometria i fotometria	22
2.4.	Modele źródeł światła w grafice komputerowej.	24
2.5.	Interakcja światła i materii	25
2.6.	Model oświetlenia Phong'a	27
3.	Metody globalnego oświetlenia	31
3.1.	Metody próbkowania punktowego	31
3.1.1.	Rekursywne śledzenie promieni	32
3.1.2.	Rozproszone śledzenie promieni	36
3.1.3.	Śledzenie ścieżek	38
3.1.4.	Dwukierunkowe śledzenie ścieżek	42
3.1.5.	Metropolis Light Transport.	44
3.2.	Metoda energetyczna	46
3.3.	Mapowanie fotonowe	50
3.3.1.	Emisja fotonów ze źródła światła	50
3.3.2.	Propagacja fotonów w scenie.	54
3.3.3.	Zapis do mapy fotonowej.	56
3.3.4.	Rendering z zastosowaniem mapy fotonów	58
3.4.	Podsumowanie	61

4.	Rozwój metody mapowania fotonowego	63
4.1.	Wyszukiwanie sąsiadujących fotonów	63
4.1.1.	Reprezentacja mapy fotonów za pomocą drzew kd	64
4.2.	Wyznaczanie gęstości energii fotonów	70
4.2.1.	Metoda mapowania promieni.	73
4.2.2.	Grupowe mapowanie fotonowe	76
4.3.	Ograniczenie pojemności mapy fotonowej	76
4.3.1.	Importony.	77
4.3.2.	Progresywne mapowanie fotonowe	78
4.3.3.	Stochastyczne progresywne mapowanie fotonowe.	79
4.4.	Mapowanie fotonów w czasie.	80
5.	Metoda strumieniowego mapowania fotonowego	83
5.1.	Definicja strumienia fotonów	83
5.2.	Emisja strumienia fotonów ze źródła światła	84
5.3.	Propagacja strumienia fotonów w scenie	85
5.4.	Tłumienie strumienia fotonów	87
5.5.	Zapis do mapy strumieni fotonów.	88
5.6.	Rendering z zastosowaniem mapy strumieni	89
5.7.	Podsumowanie	92
6.	System renderujący	95
6.1.	Architektura systemu	95
6.2.	Interfejs aplikacji renderującej	97
6.3.	Implementacja metody strumieniowego mapowania fotonowego	98
7.	Rezultaty renderingu obrazów metodą strumieniowego mapowania fotonowego	105
7.1.	Sceny testowe	105
7.2.	Wpływ parametrów metody na obraz	108
7.3.	Uzyskane efekty globalnego oświetlenia	116
7.3.1.	Przenikanie kolorów	116
7.3.2.	Efekty kaustyczne	117
7.3.3.	Miękkie cienie	118
7.4.	Porównanie klasycznej i strumieniowej metody mapowania fotonowego	120
7.5.	Testy percepcyjne	122
7.6.	Analiza wyników testów percepcyjnych	126

8.	Podsumowanie	135
8.1.	Podsumowanie wyników	135
8.2.	Dalsze kierunki badań.	136
9.	Bibliografia	139
10.	Spis rysunków, tabel, pseudokodów i algorytmów	149
10.1.	Spis rysunków	149
10.2.	Spis tabel	158
10.3.	Spis pseudokodów.	159
10.4.	Spis algorytmów.	160
11.	Aneks	161
11.1.	Renderingi testowe	162
11.2.	Formularze testów percepcyjnych.	165

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Dążenie do wizualnego realizmu obrazów generowanych komputerowo odegrało wiodącą rolę w rozwoju grafiki komputerowej na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat [Pha10]. Współczesne programy umożliwiają wizualizację nawet najbardziej nieprawdopodobnych pomysłów w postaci fotorealistycznych¹ obrazów, nieustannie testując naszą zdolność do rozróżnienia pomiędzy rzeczywistością a iluzją wykreowaną na ekranie komputera. Termin fotorealizm w kontekście grafiki komputerowej odnosi się do zagadnień komputerowej syntezy obrazów. Obraz wygenerowany komputerowo nazywany jest fotorealistycznym, gdy wywołuje u widza wrażenie oglądania sceny zarejestrowanej w rzeczywistości aparatem fotograficznym [Fle99]. Chociaż fotografia jest w tym wypadku traktowana jako zapis rzeczywistości, należy pamiętać, że stanowi ona jedynie jej reprezentację, ukształtowaną zarówno przez subiektywną wizję autora jak i możliwości techniczne [Hop97].

Stopień wymaganego wizualnego realizmu zależy od docelowego przeznaczenia obrazu. W przypadku wielu praktycznych zastosowań grafiki komputerowej fotorealizm obrazu jest warunkiem koniecznym. Przykładem są komputerowe efekty specjalne w filmach. Wykreowane wirtualnie postacie, rekwizyty lub scenografie,

¹ fotorealizm (ang. photorealism) - termin wprowadzony przez Louis K. Meisela w 1968 roku dla określenia nurtu w malarstwie amerykańskim w drugiej połowie XX wieku, którego przedstawiciele dążyli do jak najwierniejszej imitacji rzeczywistości [Kur79]. Najczęściej stosowaną techniką było rzutowanie za pomocą epidiaskopu samodzielnie wykonanych fotografii wzorcowych na płótno, a następnie żmudne odwzorowanie najdrobniejszych szczegółów [Aba81].

choćby zupełnie fantastyczne muszą wyglądać możliwie realistycznie, aby widzowie uwierzyli w ich autentyczność. Dodatkowe wyzwanie dla grafików stanowi kompoziting, który momentalnie uwydatnia wszelkie niedociągnięcia i sztuczności przez jednoczesne zestawienie elementów wirtualnych wykreowanych na ekranie komputera i elementów rzeczywistych, zarejestrowanych za pomocą kamery.

Następnym polem zastosowań metod fotorealistycznej syntezy obrazów są aplikacje wirtualnej rzeczywistości (ang. virtual reality). Na przykład dla symulatorów treningowych do nauki pilotażu, realistyczna wizualizacja środowiska oddająca nawet najdrobniejsze szczegóły otoczenia powoduje wzrost immersji² zwiększając tym samym efektywność szkolenia [Chi94]. Analogicznie w przypadku aplikacji szkoleniowych umożliwiających wirtualne przeprowadzenie operacji chirurgicznych realizm obrazu jest wymogiem koniecznym. Oczywiście w obu wymienionych przykładach nawet najdoskonalsza wizualizacja nie zrekompensuje ewentualnych braków w precyzji sterowania i nienaturalnego sposobu nawigacji.

Współczesne gry komputerowe przyzwyczyły graczy do bardzo wysokiej jakości grafiki. Bardzo często to właśnie fotorealistyczna oprawa wizualna decyduje o marketingowym sukcesie gry. Podobnie jak w przypadku systemów rzeczywistości wirtualnej wysoki poziom wizualnego realizmu wpływa na poczucie zanurzenia graczy w wirtualnym środowisku i ich zaangażowanie w rozgrywkę. W przeciwieństwie do produkcji filmowych dla których proces tworzenia cyfrowych efektów specjalnych może trwać miesiącami, gry komputerowe wymagają zaawansowanych metod renderingu generujących obrazy w czasie rzeczywistym z prędkością przekraczającą nawet 30 klatek na sekundę (ang. frames per second, fps).

Fotorealizm jest również kluczowym aspektem we wszelkiego rodzaju wizualizacjach architektonicznych prezentujących zarówno planowane inwestycje jak i rekonstrukcje obiektów zabytkowych (rys.1.1). Takie wizualizacje wymagają szczegółowego odwzorowania modeli geometrycznych i realistycznego oświetlenia, aby już na etapie projektu w przekonujący sposób zaprezentować jak będzie wyglądał ukończony budynek [Cus09]. Dodatkowa możliwość wirtualnego spaceru (ang. virtual walkthrough) pozwala ocenić przestrzeń planowanego obiektu jeszcze przed jego realizacją. Zwiększenie poziomu realizmu poprzez symulację naturalnego oświetlenia dodatkowo wzmacnia poczucie obecności w wirtualnym środowisku.

W przypadku zabytków, gdy fizyczna odbudowa z powodów technicznych lub braku dostatecznej dokumentacji jest niemożliwa wirtualna rekonstrukcja pozostaje niekiedy jedyną możliwością prezentacji dziedzictwa kulturowego [Szc13] (rys. 1.2). Im bardziej realistyczna wizualizacja, tym mocniej oddziałuje ona w świadomości widza i przekłada się na wiarygodność rekonstruowanego obiektu, nawet gdy jest częściowo oparta jedynie na hipotetycznych przesłankach [Mue04].

2 immersja - tutaj w znaczeniu zanurzenia użytkownika w świecie rzeczywistości wirtualnej.



Rys. 1.1. Fotorealistyczna rekonstrukcja parowozu PM36-1. © Rafał Jędrzejewski, 2013



Rys. 1.2. Wirtualna rekonstrukcja wnętrza synagogi w Brzezinach zaprojektowanej przez Ignacego Markiewicza, spalonej w 1939 roku. © Maciej Białek, 2013

Zalety płynące z wiernego odwzorowania rzeczywistości wydają się być oczywiste, jednakże w dalszym ciągu problematyczne jest udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dlaczego konkretny obraz jest określany przez widzów jako realistyczny.

Na postrzeganie wizualnego realizmu wpływa bowiem równocześnie wiele czynników takich jak miękkość cieni, liczba źródeł światła, gładkość powierzchni, zróżnicowanie kształtów i liczby obiektów [Rad02]. Istotne są także czynniki subiektywne w postaci wcześniejszych obserwacji rzeczywistości i indywidualnych możliwości percepcyjnych widza. Prowadzone są badania z wykorzystaniem urządzeń śledzących ruch gałek ocznych (ang. eye-tracking systems) mające na celu identyfikację obszarów szczególnie istotnych dla postrzegania realizmu obrazów generowanych komputerowo [ElH08]. Fotorealizm jest w związku z powyższym zagadnieniem interdyscyplinarnym łączącym wiedzę z zakresu komputerowej syntezy obrazów i psychofizjologii widzenia [McN98].

W kontekście oceny obrazu konieczne jest rozróżnienie tego, co obraz pokazuje (np. przenikające się plamy barwne, ostrzej lub bardziej miękko zarysowane kształty, odwzorowane zjawiska wynikające z padającego światła) od tego co obraz przedstawia (np. różne rozpoznawalne przedmioty, bryły o różnej materialności umieszczone w zamkniętej przestrzeni i w różny sposób oświetlone) [Ing46]. W przypadku obrazów testowych, które przedstawiają znaną scenę, pojęcie „jakości obrazu” odnosi się do tego, co obrazy te pokazują, czyli o jakości tych obrazów decydują takie ich wizualne cechy, jak: wyraźne przenikanie się odbijanych przez ściany kolorów, gładkość gradientowa, brak zbędnych plamek (szumu), miękkość zmieniania się jasności, odwzorowane zjawiska wynikające z padającego światła. Przed przystąpieniem do oceny jakości obrazów, szczególnie przez osoby nieobeznane z zagadnieniami fotorealistycznego renderingu, niezwykle ważne jest wskazanie powyższych wizualnych cech obrazu decydujących o jego jakości, aby zapewnić widzom możliwie zobiektywizowane kryteria oceny.

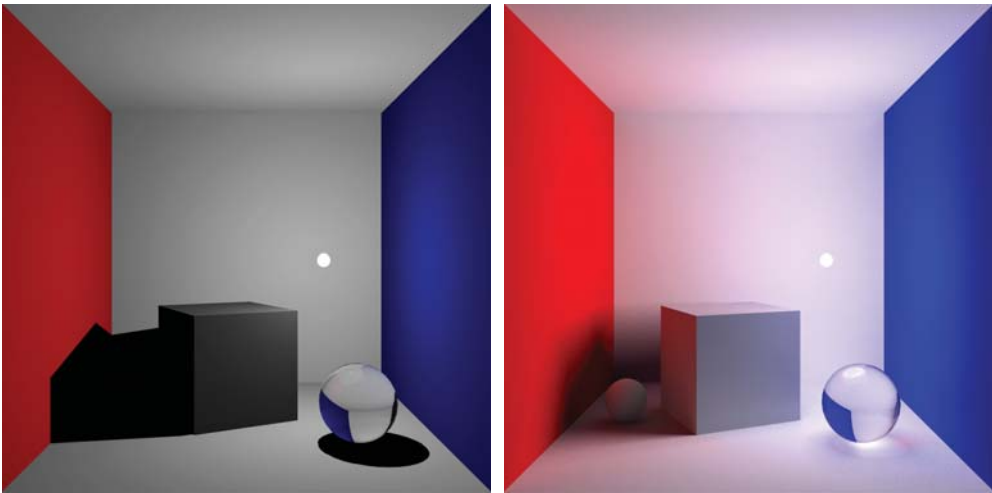
Profesjonalni artyści zajmujący się grafiką trójwymiarową wskazują, że spośród wszystkich przytoczonych czynników wpływających na percepcję wizualnego realizmu obrazu najważniejsze jest naturalne oświetlenie wirtualnej sceny umożliwiające odtworzenie wszystkich zjawisk optycznych obserwowanych w rzeczywistości [Rom13], [Car13].

1.2. Globalny model oświetlenia

Najprostszym modelem symulacji oświetlenia w wirtualnej scenie jest model lokalny. Zakłada on, że każdy obiekt renderowany jest niezależnie od reszty geometrii biorąc pod uwagę wyłącznie promienie światła pochodzące bezpośrednio od źródeł światła z pominięciem światła odbitego od innych powierzchni, chociaż z codziennych obserwacji wiemy, że przedmioty oświetlane są również przez otoczenie w którym się znajdują. W konsekwencji w zależności od techniki renderingu widz nie zobaczy na obrazie cieni, które muszą być generowane dodatkowymi algorytmami (rendering

z Z-buforem) lub obiekty znajdujące się w cieniu nie będą widoczne (rendering metodą śledzenia promieni).

W przypadku zastosowania globalnego modelu oświetlenia, obiekty będące w cieniu są również oświetlone za pomocą promieni odbitych lub przechodzących przez inne powierzchnie w scenie, skutkiem czego na obszarach sąsiadujących powierzchni widoczne jest przenikanie kolorów (ang. color bleeding). Dzięki śledzeniu oświetlenia pośredniego możliwe jest również odtworzenie efektów kaustycznych (rys. 1.3). Pomimo stale rosnącej mocy obliczeniowej komputerów jest to w dalszym ciągu proces skomplikowany i bardzo czasochłonny.



Rys. 1.3. Oświetlenie lokalne (po lewej) uniemożliwia dostrzeżenie obiektów schowanych w cieniu. Globalne oświetlenie (po prawej) sprawia, że obiekty będące w cieniu są również oświetlone za pomocą promieni odbitych od innych powierzchni, na obszarach sąsiadujących powierzchni zachodzi przenikanie kolorów, widoczne są również efekty kaustyczne (ilustracja autora)

Generowanie fotorealistycznych obrazów wymaga zastosowania algorytmów globalnego oświetlenia. Wiodącą obecnie metodą globalnego oświetlenia stosowaną w komercyjnych silnikach renderujących [Ste07] jest mapowanie fotonowe (ang. Photon Mapping). Podstawowa wersja algorytmu mapowania fotonowego zakłada przebieg dwuetapowy [Jen96]. Pierwszy etap polega na wystrzeleniu ze źródła światła i rozpropagowaniu w scenie określonej liczby fotonów, o których informacje zbierane są w strukturze danych zwanej mapą fotonową. Drugi etap to rendering sceny za pomocą algorytmu rekursywnego śledzenia promieni (ang. Recursive Ray Tracing), w oparciu o zgromadzone w mapie fotonowej dane na temat radiancji w danym punkcie geometrii.

Zaletą metody mapowania fotonowego jest uniezależnienie obliczeń natężenia oświetlenia od reprezentacji geometrycznej sceny. Dzięki temu algorytm umożliwia

renderowanie scen składających się z milionów trójkątów i w przeciwieństwie do metody energetycznej (ang. Radiosity) nie wymaga jej podziałów na płyty [Coh93]. Mapowanie fotonowe, podobnie jak metody Monte Carlo [Kaj86], [Vea97], [Laf93], [Jen01a], pozwala na uzyskanie efektów globalnego oświetlenia takich jak kaustyka, oświetlenie pośrednie, przenikanie kolorów i odbicia pod powierzchnią (ang. subsurface scattering), jednakże skutkuje zdecydowanie mniejszym szumem na wyrenderowanych obrazach.

Praktyczne zastosowanie algorytmu mapowania fotonowego niesie ze sobą ograniczenie rozmiaru mapy fotonowej oraz ograniczenie czasu potrzebnego na wyszukanie ustalonej liczby sąsiadujących fotonów. Prace mające na celu wyeliminowanie tych ograniczeń prowadzone są aktualnie w wielu ośrodkach uniwersyteckich zajmujących się grafiką komputerową (m.in. Stanford University, University of California). Kluczowe w kontekście dalszego rozwoju metody mapowania fotonowego jest zdefiniowanie obszarów zastosowań, gdyż część algorytmów sprawdza się bardzo dobrze dla specyficznych scen [Laf93], [Vea97], [Bor11].

Badania naukowe prowadzone przez autora niniejszej monografii [Guz11a], [Guz12a], [Guz12b] doprowadziły do opracowania innowacyjnej metody dystrybucji fotonów w scenie, polegającą na oryginalnej koncepcji powiązania fotonów w strumienie.

1.3. Układ książki

Rozdział 2 zawiera podstawowe prawa optyki geometrycznej i wielkości radiometryczne oraz opisuje wybrane modele interakcji światła i materii stosowane w procesie fotorealistycznego renderingu.

Rozdział 3 prezentuje najważniejsze w kontekście tematyki niniejszej monografii metody globalnego oświetlenia ze szczególnym uwzględnieniem klasycznej metody mapowania fotonowego, będącej obecnie najdynamiczniej rozwijającym się obszarem badań.

Rozdział 4 przedstawia aktualne kierunki badań nad metodą mapowania fotonowego mające na celu przyspieszenie procesu wyszukiwania sąsiadujących fotonów, uniezależnienie dokładności obliczeń od rozmiaru mapy fotonowej, redukcję artefaktów wynikających z niedostatecznej precyzji wyznaczania gęstości energii fotonów w rozpatrywanym punkcie powierzchni oraz mapowanie fotonów w dziedzinie czasu dla scen dynamicznych.

Rozdział 5 opisuje autorską metodę strumieniowego mapowania fotonowego mającą na celu usprawnienie algorytmu propagacji fotonów, zmniejszenie artefaktów w postaci szumu na renderowanych obrazach oraz uwydatnienie efektów kaustycznych i przenikania kolorów.

Rozdział 6 opisuje system renderujący z zaimplementowaną metodą strumieniowego mapowania fotonowego, wykonany w celu testowania algorytmów fotorealistycznej syntezy obrazów.

Rozdział 7 prezentuje rezultaty renderingu obrazów za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla różnych scen testowych. W dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę wpływu poszczególnych parametrów metody na jakość generowanych obrazów oraz opisano testy percepcyjne mające na celu porównanie metody strumieniowej ze standardowym mapowaniem fotonowym.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników i wnioski, a także prezentuje potencjalne kierunki dalszych badań.

1.4. Wykaz oznaczeń

W niniejszej monografii przyjęto następujące oznaczenia:

dA_i	– elementarna powierzchnia i
dA_j	– elementarna powierzchnia j
E_i	– natężenie napromieniowania
F_{ij}	– współczynnik sprzężenia między elementarną powierzchnią i oraz j
$f_r(x, \omega', \omega)$	– funkcja BRDF w punkcie x określająca ile energii docierającej z kierunku ω' zostanie odbite w kierunku ω
$G(x, x')$	– funkcja opisująca relacje geometryczne między punktami x i x'
H	– wektor połówkowy w modelu Blinna-Phonga
I_N	– natężenie światła w kierunku prostopadłym do powierzchni rozpraszającej
$L(x, \omega)$	– radiancja światła w dowolnym punkcie x geometrii, obserwowana w kierunku ω
$L_e(x, \omega)$	– radiancja światła wyemitowanego z punktu x w kierunku ω
$L_r(x, \omega)$	– radiancja światła odbitego z punktu x w rozpatrywanym kierunku ω
$L_i(x', \omega')$	– radiancja powierzchni świecącej $dA_{x'}$ w kierunku ω'
M_i	– gęstość strumienia światła (emitancja) opuszczającego elementarną powierzchnię i

m_r	– dopuszczalna liczba odbić strumieni fotonów (ang. number of stream reflections)
M_{ei}	– emitancja związana ze strumieniem emitowanym przez powierzchnię i
M_j	– gęstość strumienia światła opuszczającego elementarną powierzchnię j
N	– wektor normalny
n_s	– liczba próbek dla jednego piksela renderowanego obrazu (ang. number of samples)
n_f	– liczba wyemitowanych fotonów (ang. number of emitted photons)
n_{fs}	– liczba wyemitowanych strumieni fotonów (ang. number of emitted photon streams)
n_{fa}	– liczba fotonów stowarzyszonych w strumieniu (ang. number of associated photons)
n_{fc}	– liczba wyemitowanych fotonów kaustycznych (number of emitted caustic photons)
n_1	– bezwzględny współczynnik załamania światła ośrodka pierwszego
n_2	– bezwzględny współczynnik załamania światła ośrodka drugiego
n_{21}	– współczynnik załamania światła przy przejściu z ośrodka pierwszego do drugiego
O	– wektor odbitego promienia światła
P	– wektor padającego promienia światła
r_s	– promień strumienia fotonów (ang. radius of photon stream)
W	– wektor od punktu padania światła do obserwatora
$V(x, x')$	– funkcja widoczności; $V = 0$ jeśli między punktami x i x' znajduje się powierzchnia blokująca światło, w przeciwnym wypadku $V = 1$
Z	– wektor załamanego promienia światła
ϱ_i	– zdolność odbijania światła przez elementarną powierzchnię i

2. Światło i materia

Fotorealistyczna synteza obrazów wymaga wiedzy z zakresu fizyki opisującej proces emisji i propagacji światła. Odwzorowanie w wirtualnym środowisku zjawisk optycznych takich jak odbicia zwierciadlane, refrakcja czy kaustyka jest niezbędne dla zachowania realizmu generowanego obrazu.

Niniejszy rozdział przedstawia podstawowe prawa optyki geometrycznej, wielkości radiometryczne i fotometryczne oraz wybrane modele interakcji światła i materii stosowane w grafice komputerowej.

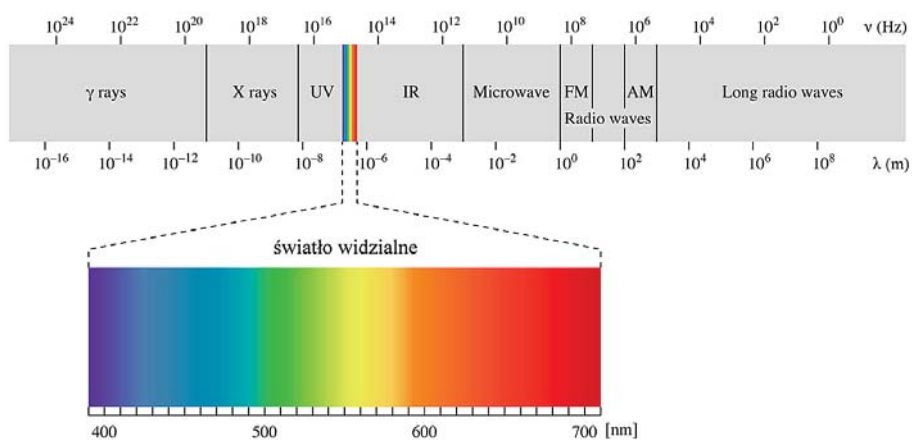
2.1. Dualizm korpuskularno-falowy światła

Światło jest promieniowaniem elektromagnetycznym, dzięki któremu widzimy otaczający nas świat. Promienie światła odbite od obiektów docierają do naszego oka i pobudzają receptory na siatkówce, które następnie wysyłają impulsy do mózgu [Fal86], [Mło98], [Corn70]. Zakres długości fal, które jesteśmy w stanie zarejestrować za pomocą aparatu wzrokowego wynosi od 380nm do 780nm, w zależności od indywidualnych predyspozycji człowieka i stanowi jedynie wąski przedział całego spektrum fal elektromagnetycznych (rys. 2.1).

Złożona natura światła od wieków była przedmiotem zainteresowania naukowców. W 1690 roku Christiaan Huygens przedstawił falową teorię światła, według której światło porusza się analogicznie do ruchu fal rozchodzących się w ciałach sprężystych. Przeprowadzone przez Huygens’a doświadczenia potwierdzały tę teorię, dzięki której możliwe było wytłumaczenie zjawiska dyfrakcji światła,

czyli uginania się fal na przeszkodach. Późniejsze prace Jamesa Clerka Maxwella dowiodły, że światło jest w istocie falą elektromagnetyczną [Hal03].

Odminną teorię postulował Isaac Newton, twierdząc że światło rozprzestrzenia się prostoliniowo. W książce „Optics”, opublikowanej w 1704 roku, opisuje światło jako strumień bardzo szybko poruszających się korpuskuł (łac. corpusculum). Na podstawie przeprowadzonych badań demonstrujących załamanie i rozszczepienie światła słonecznego przez pryzmat, Newton przypuszczał, że cząstki światła posiadają różne właściwości takie jak masa i prędkość [Smi07]. Korpuskularną naturę światła potwierdza również zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne, polegające na przekazaniu energii fotonów pojedynczym elektronom, oraz efekt Comptona¹.



Rys. 2.1. Spektrum fali elektromagnetycznej dla światła widzialnego [Hal03]

Współczesna fizyka przyjmuje, że światło ma dwoistą, korpuskularno-falową naturę. Oznaczano, że światło może być traktowane zarówno jako fala, która ulega dyfrakcji i interferencji, jak i strumień fotonów. Foton jest cząstką elementarną nie posiadającą ładunku elektrycznego ani momentu magnetycznego, o masie spoczynkowej równej zero, przemieszczającą się w próżni z prędkością $3 \cdot 10^8$ m/s.

2.2. Optyka geometryczna

Optyka jest działem fizyki opisującym zachowanie światła i jego oddziaływanie z materią. W zależności od postrzegania natury światła wyróżnia się optykę geome-

¹ efekt Comptona - zjawisko rozpraszania promieniowania rentgenowskiego i promieniowania gamma na swobodnych lub słabo związanych elektronach, w wyniku którego następuje zwiększenie długości fali promieniowania [Hal03].

tryczną, optykę falową i optykę kwantową. Optyka geometryczna jest najstarszym działem optyki i pozwala opisać zjawisko odbicia światła, refrakcji oraz kaustyki. Optyka falowa uwzględnia falową naturę światła i umożliwia opis takich zjawisk jak interferencja, dyfrakcja czy polaryzacja. Optyka kwantowa kompleksowo opisuje zachowanie światła za pomocą mechaniki kwantowej [Smi07].

W przypadku większości scen generowanych przy użyciu algorytmów fotorealistycznej syntezy obrazów, obiekty i odległości między nimi mają wielkość znacząco większą od długości fali światła, dlatego model oświetlenia realizowany jest zazwyczaj w oparciu o prawa optyki geometrycznej nie wymagające tak dużego poziomu szczegółowości i tym samym złożoności obliczeniowej jak optyka kwantowa.

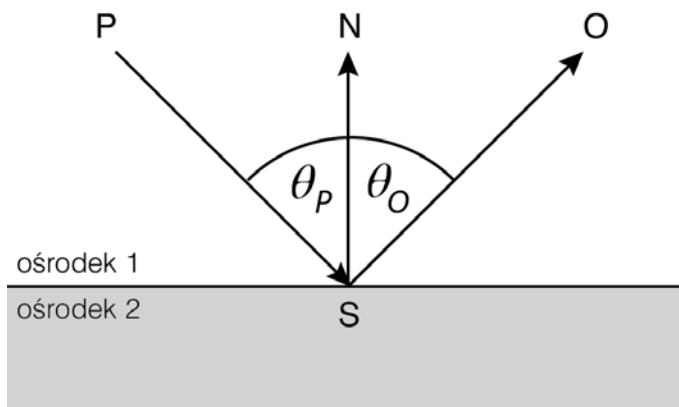
Optyka geometryczna zakłada, że [Hec12]:

- światło rozchodzi się po liniach prostych w postaci nieskończonej liczby promieni, promień może być reprezentowany geometrycznie za pomocą półprostej;
- liniowy rozkład promieni światła jest możliwy jedynie w ośrodku optycznie jednorodnym tzn. posiadającym niezmiennie właściwości fizyczno-chemiczne w całej swojej objętości;
- rozmiary obiektów i otworów sceny są znacząco większe od długości fali światła;
- zgodnie z zasadą Fermata promień świetlny biegnąc od punktu A do punktu B wybiera taką drogę, by czas potrzebny na jej przebycie był ekstremalny, tzn. najkrótszy lub najdłuższy;
- bieg promieni światła jest odwracalny, tzn. jeśli światło biegło od punktu A do punktu B po pewnej drodze, to w tych samych warunkach światło biegnące od punktu B do punktu A będzie przebywało tę samą drogę, ale w przeciwnym kierunku.

2.2.1. Odbicie zwierciadlane

Obiekty o właściwościach zwierciadlanych odbijają promienie światła, dzięki czemu obserwujemy na ich powierzchni obraz otoczenia, w którym się znajdują. Odbicie zwierciadlane (ang. specular reflection) zachodzi na gładkiej powierzchni oddzielającej dwa różne ośrodki np. powietrze i lustro wody. Zgodnie z prawem odbicia promień świetlny P zwany promieniem padającym odbija się na granicy ośrodków w punkcie S jako promień odbity O pod kątem odbicia θ_o równym kątowi padania θ_p względem wektora normalnego N (rys. 2.2):

$$\theta_o = \theta_p. \quad (2.1)$$

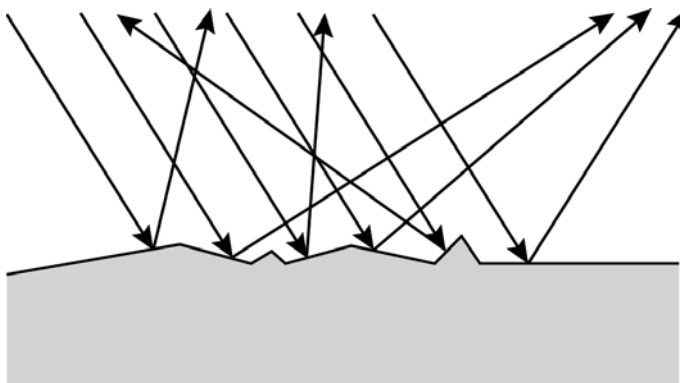


Rys. 2.2. Schemat odbicia zwierciadlanego promieni (ilustracja autora)

Promień padający P , promień odbity O i wektor normalny N leżą w jednej płaszczyźnie [Hec12]. Promień padający prostopadle do powierzchni płaskiej ulegnie odbiciu pod kątem $\theta_o = 0^\circ$.

2.2.2. Odbicie rozproszone

Promienie światła padające na powierzchnię matową, o mikroskopijnych nierównościach niewyczuwalnych dla ludzkiego zmysłu wzroku i dotyku (np. papier), zostają odbite w różnych kierunkach (rys. 2.3) w rezultacie czego wiązka światła ulega rozproszeniu (ang. diffuse reflection). O rozpraszaniu światła decyduje stopień chropowatości powierzchni (ang. roughness).



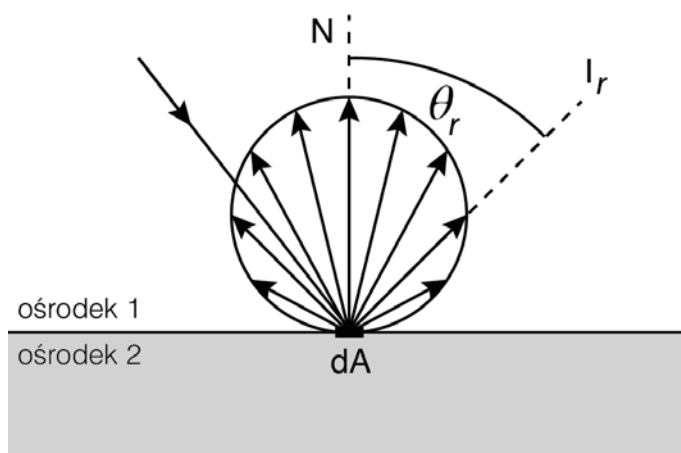
Rys. 2.3 Schematyczny rozkład odbicia promieni światła padających na matową powierzchnię w skali mikroskopowej (ilustracja autora)

Powierzchnie idealnie rozpraszające (tzw. powierzchnie lambertowskie) rozpraszają światło równomiernie we wszystkich kierunkach. Zgodnie z prawem Lamberta sformułowanym w 1760 roku natężenie światła I_r o danej długości fali, odbitego od powierzchni elementarnej dA w dowolnym kierunku obserwacji pod kątem θ_r , wyrażone jest następującym wzorem (rys. 2.4):

$$I_r = I_N \cos \theta_r, \quad (2.2)$$

gdzie:

I_N - natężenie światła w kierunku prostopadłym do powierzchni rozpraszającej.



Rys. 2.4. Schemat prawa Lamberta (ilustracja autora)

2.2.3. Refrakcja

Część wiązki światła padającej na granicę ośrodków, która nie uległa odbiciu, przechodzi przez powierzchnię graniczną i rozchodzi się dalej w nowym ośrodku. Powstały w ten sposób promień nazywany jest promieniem załamanym Z (rys. 2.5). Zjawisko refrakcji polega na zmianie kierunku rozchodzenia się światła w wyniku przejścia przez powierzchnię rozgraniczającą dwa różne ośrodki. Fakt, że światło może rozchodzić się w danym ośrodku świadczy o jego przezroczystości.

Prawo fizyki opisujące zmianę kierunku biegu promienia światła przy przejściu przez granicę między dwoma jednorodnymi i przezroczystymi ośrodkami o różnych współczynnikach załamania (ang. index of refraction, IOR) zostało sformułowane przez Willebrord Snell w 1621 roku [Hec12]. Zgodnie z prawem Snella, promień padający P i promień załamany Z oraz prosta prostopadła do powierzchni w punkcie padania leżą w jednej płaszczyźnie, a kąty spełniają zależność:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (2.3)$$

gdzie:

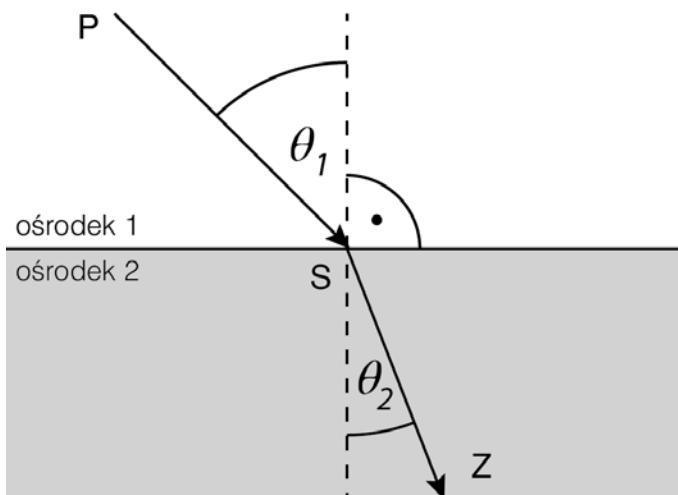
n_{21} – współczynnik załamania światła przy przejściu z ośrodka pierwszego do drugiego,

n_1 – bezwzględny współczynnik załamania światła ośrodka pierwszego,

n_2 – bezwzględny współczynnik załamania światła ośrodka drugiego,

θ_1 – kąt padania między promieniem padającym, a prostą prostopadłą do powierzchni granicznej ośrodków,

θ_2 – kąt załamania między promieniem załamanym, a prostą prostopadłą do powierzchni granicznej.



Rys. 2.5. Schemat załamania wiązki światła padającej na płaską powierzchnię rozgraniczającą dwa ośrodki (ilustracja autora)

Bezwzględny współczynnik załamania światła jest charakterystyczny dla danego ośrodka, a jego wartość jest równa stosunkowi prędkości światła w ośrodku do prędkości światła w próżni. Na podstawie tabeli 2.1 można zaobserwować, że bezwzględny współczynnik załamania rośnie wraz z gęstością ośrodka.

Kąt padania promienia przy którym promień załamany tworzy z normalną kąt prosty nazywany jest kątem granicznym. Dla kąta padania większego od kąta granicznego, promień światła nie załamuje się i powstaje efekt całkowitego wewnętrznego odbicia.

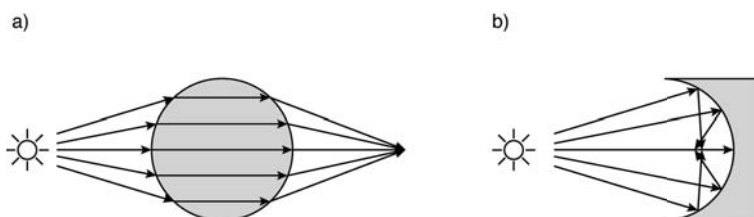
Tabela 2.1. Bezwzględne współczynniki załamania światła dla wybranych ośrodków optycznych (na podstawie [Hal03])

ośrodek	bezwzględny współczynnik załamania
próżnia	1
powietrze (temp. 0°C, ciśnienie 1 atm)	1,00029
woda (temp. 20°C)	1,33
alkohol etylowy	1,36
szkło typowe (kron)	1,52
chlorek sodu	1,54
szafir	1,77
diamant	2,24

2.2.4. Kaustyka

Obserwując zjawiska odbicia i refrakcji światła przez obiekty o powierzchniach zakrzywionych możemy dostrzec towarzyszące im plamy świetlne. Jest to tak zwany efekt kaustyczny czyli zjawisko optyczne będące wynikiem ogniskowania promieni świetlnych wychodzących z jednego punktu pod różnymi kątami, które zostały następnie załamane bądź odbite przez układ optyczny. Kształt uzyskanego efektu kaustycznego zależy od usytuowania źródła światła względem obiektu i kształtu samego obiektu załamującego bądź odbijającego promienie światła. Przez wzgląd na przyczynę powstawania rozróżnia się dwa rodzaje efektów kaustycznych (rys. 2.6):

- diakaustyka – efekt uzyskany w wyniku załamania promieni świetlnych przez układ optyczny posiadający właściwości refrakcyjne.
- katakaustyka – efekt powstały w wyniku odbicia promieni świetlnych od powierzchni o właściwościach zwierciadlanych.



Rys. 2.6. Schemat powstawania efektów kaustycznych: a) diakaustyka, b) katakaustyka (ilustracja autora)

2.3. Radiometria i fotometria

Radiometria jest nauką zajmującą się pomiarem fal elektromagnetycznych w zakresie promieniowania optycznego, a więc w przedziale częstotliwości od 3×10^{11} do 3×10^{16} Hz [Ash94b]. Poniżej przedstawiono definicje podstawowych wielkości radiometrycznych i ich jednostki.

Strumień energii $d\Phi$ to ilość energii dQ przypadająca na jednostkę czasu:

$$d\phi = \frac{dQ}{dt} \quad \left[\frac{J}{s} \right]. \quad (2.4)$$

Natężenie napromieniowania E nazywane również irradiancją energii, to stosunek strumienia energii $d\Phi$ padającego na jednostkową powierzchnię dA , do powierzchni dA :

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.5)$$

Emitancja M to stosunek strumienia energii $d\Phi$ opuszczającego jednostkową powierzchnię dA w wyniku emisji lub odbicia, do powierzchni dA :

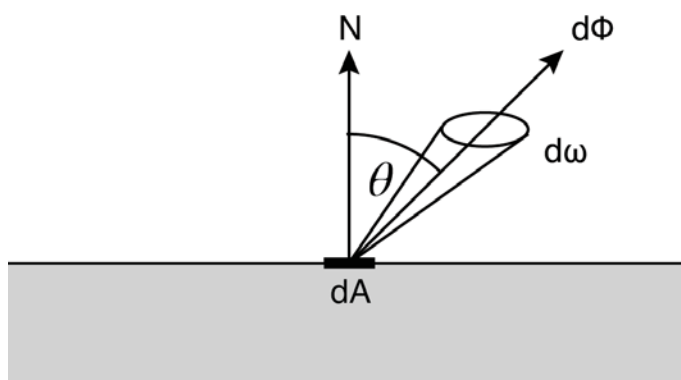
$$M = \frac{d\phi}{dA} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.6)$$

Natężenie promieniowania I jest stosunkiem strumienia energii $d\Phi$ wypromieniowanego przez kąt bryłowy $d\omega$, do wartości tego kąta:

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad \left[\frac{W}{sr} \right]. \quad (2.7)$$

Luminancja energetyczna L , nazywana również radiancją, jest określona jako stosunek natężenia promieniowania dI do powierzchni rzutu jednostkowej powierzchni dA na płaszczyznę prostopadłą do kierunku rozchodzenia się promieniowania wyznaczonego przez kąt θ (rys.2.7):

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{d\phi}{d\omega \cdot dA \cdot \cos\theta} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right]. \quad (2.8)$$



Rys. 2.7. Luminancja energetyczna (ilustracja autora)

Przedstawionym powyżej wielkościom radiometrycznym odpowiadają wielkości fotometryczne (tabela 2.2) światła rejestrowanego przez ludzkie oko, które oddają subiektywne odczucia wzrokowe.

Tabela 2.2. Zestawienie wielkości radiometrycznych i fotometrycznych

Radiometria	Fotometria
Strumień energii (ang. radiant flux)	Strumień światła (ang. luminous energy)
Natężenie napromieniowania (ang. irradiance)	Natężenie oświetlenia (ang. illuminance)
Emitancja (ang. radiant exitance)	Emitancja (ang. luminous exitance, radiosity)
Natężenie promieniowania (ang. radiant intensity)	Światłość, natężenie światła (ang. luminous intensity)
Luminancja energetyczna, radiancja (ang. radiance)	Luminancja, jasność, jaskrawość (ang. luminance)

Podstawową wielkością w fotometrii jest światłość (natężenie światła), wyrażana w kandelach [cd]. Światłość I jest równa stosunkowi strumienia świetlnego $d\Phi$, wyrażanego w lumenach [lm] i emitowanego w nieskończenie mały kąt bryłowy $d\omega$, do wartości tego kąta.

Stopień jaskrawości światła lub jasności powierzchni odbieranej przez ludzkie oko definiowany jest za pomocą luminancji, wyrażanej w kandelach na metr kwadratowy [cd/m^2]. Luminancja jest miarą światłości I odbitej lub emitowanej przez powierzchnię elementarną dA w kierunku określonym przez kąt θ .

Czułość ludzkiego oka na światło zależy od długości fali. Światło zielone zostanie odebrane jako jaśniejsze niż światło czerwone lub niebieskie o takiej samej luminancji energetycznej L [$\text{W}/\text{m}^2\text{srd}$]. W grafice komputerowej stosowane jest następujące równanie dla określenia jasności barwy za pomocą modelu RGB [Fol93]:

$$L = 0,299R + 0,587G + 0,114B \quad (2.9)$$

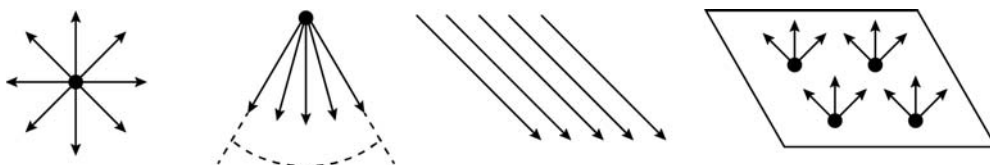
2.4. Modele źródeł światła w grafice komputerowej

Podstawowym modelem źródła światła w grafice komputerowej jest światło punktowe (ang. point light). Ten rodzaj źródła emituje promienie światła równomiernie we wszystkich kierunkach poczynając od punktu swojego umiejscowienia w scenie [Shi09] (rys. 2.8). Model światła punktowego doskonale imituje niczym nieograniczone źródła światła (np. żarówka, świeczka).

Źródło światła typu reflektorowego (ang. spot light) można traktować jako specyficzny przypadek światła punktowego, dla którego kierunek rozchodzenia się promieni światła został ograniczony przez podaną wartość kąta zwanego kątem rozwarcia reflektora (rys. 2.8). Uzyskany w ten sposób snop światła rozszerza się wraz z odległością od pozycji źródła w scenie. Podstawowe implementacje reflektorowego źródła światła pozwalają dodatkowo definiować kształt przekroju snopu światła (np. okrąg, prostokąt) oraz określić stopniowe zanikanie natężenia światła wraz z odległością od środka przekroju przez wprowadzenie dodatkowego kąta zanikania [Pha10].

Kierunkowy model źródła światła (ang. directional light) w odróżnieniu od światła reflektorowego nie posiada punktu zaczepienia w scenie, zaś promienie światła emitowane są równolegle w wyznaczonym przez wektor kierunku (rys. 2.8). Obszar oświetlenia sceny przez źródło kierunkowe jest stały. Źródło kierunkowe może być traktowane jako szczególny przypadek źródła punktowego położonego w nieskończoności. Model źródła kierunkowego jest w związku z powyższym stosowany w grafice komputerowej do imitacji oświetlenia słonecznego - odległość Słońca od Ziemi jest tak duża, że promienie docierające do stosunkowo niewielkiej powierzchni obserwowanej przez człowieka wydają się być równoległe.

Punktowe źródła światła generują cienie o nierealistycznie ostrych konturach [Nis85]. Dlatego fotorealistyczny rendering wymaga zastosowania powierzchniowego modelu światła, który może być odwzorowany w postaci zbioru światła punktowych rozmieszczonych równomiernie na siatce i o ograniczonych kierunkach emisji promieni (rys. 2.8) [Pha10].



Rys. 2.8. Podstawowe modele źródeł światła: kolejno od lewej: punktowe, reflektorowe, kierunkowe, powierzchniowe (ilustracja autora)

Przedstawione cztery podstawowe typy źródeł światła stosowane w grafice komputerowej są uproszczonymi modelami matematycznymi. W rzeczywistości każde źródło światła ma powierzchnię, która może przybierać dowolny kształt i zróżnicowaną charakterystykę emisji. Przykładowo kierunek wektora natężenia światła emitowanego przez żarówkę jest różny w różnych punktach powierzchni żarówki. Zaawansowane programy do grafiki trójwymiarowej [Mur13] umożliwiają tworzenie i symulację fotometrycznych źródeł światła (ang. photometric light). Źródła te bazują na jednostkach fotometrycznych i pozwalają na emisję światła zgodnie z charakterystykami rzeczywistych źródeł światła zapisanymi w formacie IES².

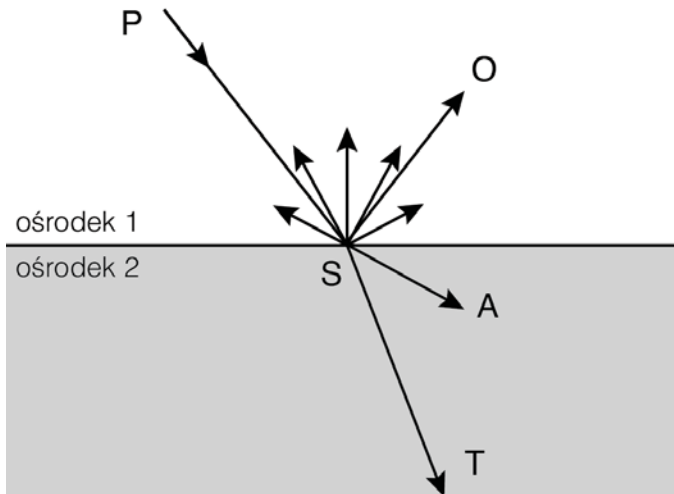
2.5. Interakcja światła i materii

W zależności od materiału z jakiego wykonany jest obiekt, część światła, które pada na jego powierzchnię może zostać absorbowana, odbita lub transmitowana przez obiekt (rys. 2.9). Transmisja światła przez obiekty przezroczyste może następować bez załamania lub z załamaniem na granicy ośrodków (patrz rozdział 2.2.3).

W świetle odbitym można wyróżnić promienie rozproszone (rozchodzące się w różnych kierunkach) i promienie równoległe, podążające w określonym kierunku. W przypadku obiektów matowych, większość światła zostaje rozproszona. Dla obiektów połyskliwych (ang. glossy), większa część światła zostanie odbita w jednym kierunku.

W przyrodzie nie istnieją powierzchnie idealne, na przykład tylko rozpraszające światło lub tylko odbijające zwierciadlanie. W grafice komputerowej światło odbite jest traktowane jako suma światła rozproszonego przez powierzchnię (patrz rozdział 2.2.2) i światła odbitego zwierciadlanie (patrz rozdział 2.2.1).

² IES (ang. Illuminating Engineering Society) - plik w formacie ASCII będący standardem zapisu danych fotometrycznych definiujących sposób dystrybucji światła, opracowany przez IES Computer Committee (<http://www.iesna.org>).



Rys. 2.9. Schemat interakcji światła i materii. Światło padające (P) na powierzchnię ośrodka 2 w punkcie S ulega absorpcji (A), odbiciu (O) i transmisji (T) (ilustracja autora)

Związek między światłem padającym na powierzchnię z jednego kierunku, a światłem odbitym od powierzchni w drugim kierunku jest definiowany przez funkcję dwukierunkowej zdolności odbijania (ang. bidirectional reflectance distribution function, BRDF) (rys. 2.10):

$$f_r(x, \theta_i, \theta_r) = \frac{dL_r(x, \theta_r)}{E_i(x, \theta_i)} = \frac{dL_r(x, \theta_r)}{L_i(x, \theta_i) |L_i \bullet N| d\omega_i}. \quad (2.10)$$

gdzie:

E_i – natężenie napromieniowania

x – punkt elementarnej powierzchni dA , w którym jest mierzone odbicie światła,

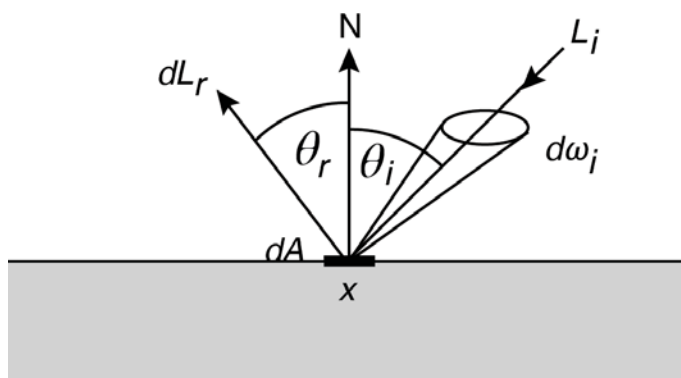
θ_i – kąt między wektorem normalnym N powierzchni w punkcie x , a wektorem kierunkowym światła padającego o radiancji L_i

θ_r – kąt między wektorem normalnym N powierzchni w punkcie x , a wektorem kierunkowym światła odbitego o radiancji L_r

• - operator iloczynu skalarnego dwóch wektorów.

Aby funkcja BRDF była zgodna z prawami fizyki muszą być spełnione dwa warunki:

- właściwości odbijania rozpatrywanej powierzchni nie zależą od kierunku w którym wędruje światło (warunek Helmholtza);
- energia odbijanego promieniowania (E_r) nie może być większa od energii padającego promieniowania (E_i) (zasada zachowania energii).



Rys. 2.10. Ilustracja funkcji BRDF (ilustracja autora)

W grafice komputerowej funkcja BRDF jest zwykle rozdzielana na część rozpraszającą (f_{rd}) i zwierciadlaną (f_{rs}) [Wyn00].

2.6. Model oświetlenia Phong

Sposób interakcji światła i materii jest opisywany w grafice komputerowej za pomocą modeli oświetlenia. W przypadku fotorealistycznego renderingu model oświetlenia powinien umożliwiać uzyskanie rezultatów nie różniących się dalece od rzeczywistego zachowania światła. Obecnie nie istnieje jeden model oświetlenia opisujący rozkład światła w kontakcie ze wszystkimi możliwymi materiałami. Modele oświetlenia można podzielić na dwie główne grupy: modele fizyczne i modele empiryczne. Tworzone są również hybrydowe modele oświetlenia łączące cechy modeli fizycznych i empirycznych (np. model Straussa [Str90]).

Fizyczne modele oświetlenia (np. Oren-Nayar, Torrance-Sparrow [Pha10]) bazują na fizycznych właściwościach materiałów. Zaletą takiego podejścia jest wierne odwzorowanie rzeczywistości, jednak praktyczne zastosowanie wiąże się z dużym kosztem czasowym obliczeń. Modele bazujące na fizyce stosuje się w przypadkach, kiedy potrzebna jest wysoka dokładność, np. gdy obiekt prezentowany jest w dużym powiększeniu, lub gdy konieczne jest odwzorowanie specyficznych dla danego materiału właściwości, np. koloru odbłasku na miedzi zależnego od wzajemnego położenia źródła światła i punktu obserwacji.

Modele empiryczne opierają się wyłącznie na obserwacjach i eksperymentalnym doborze parametrów, mając na celu uzyskanie efektów oświetlenia porównywalnych z rzeczywistością. Podstawową zaletą empirycznych modeli oświetlenia jest szybkość obliczeń przy zachowaniu dobrej jakości obrazu. Najpopularniejszym

modelem empirycznym jest model Phong [Pho75] opracowany w 1973 roku. Sformułowane przez Phong równanie pozwala obliczyć natężenie oświetlenia I w rozpatrywanym punkcie powierzchni według następującego wzoru (rys. 2.11):

$$I = k_A I_A + k_D (I_P \cos \theta_P) + k_S (I_O \cos^n \theta_W), \quad (2.11)$$

gdzie:

I_A – natężenie światła otoczenia (ang. ambient),

I_P – natężenie światła emitowanego przez źródło, padającego z kierunku P ,

I_O – natężenie światła idealnie odbitego zwierciadlanie w kierunku O ,

n – współczynnik połyskliwości powierzchni,

k_A, k_D, k_S – współczynniki materiału przyjmujące wartości z zakresu $[0,1]$, określające ile światła materiał potrafi rozpraszac (k_A, k_D), a ile odbijać zwierciadlanie (k_S),

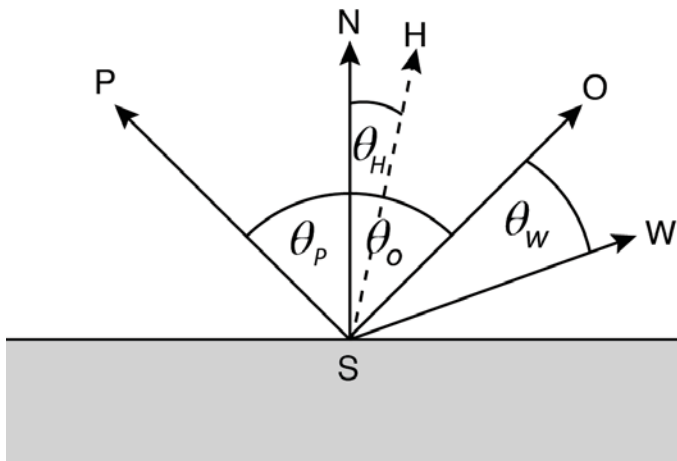
W – wektor kierunku obserwacji,

θ_P – kąt między wektorem od rozpatrywanego punktu S do źródła światła, a wektorem normalnym N ,

θ_O – kąt między wektorem odbitym w rozpatrywanym punkcie S , a wektorem normalnym N ,

θ_W – kąt między wektorem od rozpatrywanego punktu S do obserwatora, a wektorem normalnym N ,

θ_H – kąt między wektorem połówkowym H (wektorów P i W), a wektorem normalnym N .



Rys. 2.11. Ilustracja modelu oświetlenia Phong (ilustracja autora)

Gdy wektory P , O , W są znormalizowane, wówczas w równaniu (2.11) funkcje trygonometryczne można zastąpić iloczynami skalarnymi odpowiednich wektorów:

$$I = k_A I_A + k_D I_P (P \bullet N) + k_S I_O (O \bullet W)^n, \quad (2.12)$$

gdzie „ \bullet ” jest operatorem iloczynu skalarnego dwóch wektorów.

W celu przyspieszenia obliczeń natężenia oświetlenia kąt θ_W w równaniu (2.11) może być zastąpiony kątem θ_H zaś iloczyn skalarny wektorów O i W w równaniu (2.12) zostaje zastąpiony iloczynem skalarnym wektorów H i N [Bli97]. Tak zmodyfikowany model nazywany jest modelem Blinna-Phonga i jest stosowany w API graficznych czasu rzeczywistego, np. w OpenGL.

Model Phong z równania (2.12) spełnia warunek Helmholtza lecz nie spełnia zasady zachowania energii. Zasada ta jest spełniona dla $k_D + k_S \leq 1$ w zmodyfikowanym modelu Phong [Laf94]:

$$I = I_P \cdot \left(k_D \frac{1}{\pi} + k_S \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \theta_W \right) \cdot \cos \theta_P. \quad (2.13)$$

Funkcja BRDF dla równania 2.13 ma następującą postać:

$$f_r(x, \theta_P, \theta_O) = k_D \frac{1}{\pi} + k_S \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \theta_W. \quad (2.14)$$

3. Metody globalnego oświetlenia

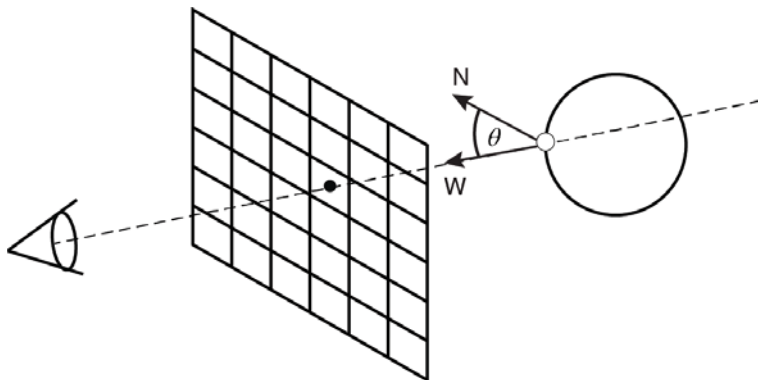
Dążenie do podniesienia poziomu realizmu obrazów generowanych komputerowo zaowocowało udoskonaleniem procesu renderingu, a w szczególności algorytmów obliczających rozkład oświetlenia w wirtualnej scenie. Równolegle rozwijane były metody bazujące na mechanizmie punktowego próbkowania sceny za pomocą promieni (ang. point-sampling methods) oraz metoda energetyczna (ang. Radiosity) traktująca światło jako falę elektromagnetyczną.

Ten rozdział prezentuje najważniejsze w kontekście tematyki niniejszej monografii metody globalnego oświetlenia ze szczególnym uwzględnieniem klasycznej metody mapowania fotonowego, będącej obecnie najdynamiczniej rozwijającym się obszarem badań.

3.1. Metody próbkowania punktowego

Opisane w tym podrozdziale metody bazują na klasycznym algorytmie rzutowania promieni (ang. Ray Casting) zaproponowanym w 1968 roku przez Arthura Appel'a [App68]. Algorytm umożliwia przedstawienie trójwymiarowej sceny w postaci dwuwymiarowego obrazu [Gol71]. Jego idea polega na wyprowadzeniu z pozycji wirtualnej kamery promienia dla każdego piksela rzutni (równoważnej z docelowym obrazem) i znalezienia najbliższego punktu przecięcia promienia z obiektem geometrycznym sceny (rys. 3.1). Kolor piksela odpowiadającego znalezionemu punktowi przecięcia bryły z promieniem wychodzącym z kamery, w najprostszym przypadku może być obliczony na podstawie kąta (θ) pomiędzy wektorem normalnym (N)

w tym punkcie, a wektorem (W) poprowadzonym z tego punktu do kamery (rys. 3.1). Punkt jest tym jaśniejszy, im mniejsza jest wartość tego kąta. Dodatkowo uwzględniając pozycję światła w scenie oraz właściwości materiału przypisanego do bryły, można wyznaczyć kolor piksela na podstawie modelu oświetlenia Phong (rozdział 2.6).



Rys. 3.1. Schemat rzutowania promienia z pozycji wirtualnej kamery przez piksel obrazu, który przecina bryłę znajdującą się w scenie (ilustracja autora)

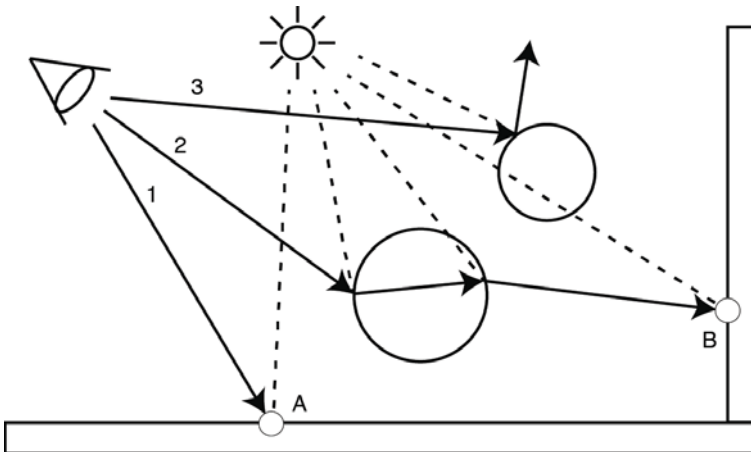
Algorytm rzutowania promieni nie rozpatruje promieni wtórnych wychodzących ze znalezionej punktu przecięcia promienia i geometrii sceny [Bou05]. Z tego powodu niemożliwe jest obliczenie odbić zwierciadlanych ani refrakcji. Rzutowanie promieni nie testuje również, czy na drodze od znalezionej punktu przecięcia promienia z geometrią do źródła światła znajdują się inne obiekty geometryczne, a zatem nie pozwala generować cieni. Pomimo powyższych ograniczeń rzutowanie promieni, przez wzgląd na szybkość działania algorytmu oraz prostotę obliczania przecięć promieni z bryłami opisanymi za pomocą równań parametrycznych, zyskało zastosowanie przy produkcji pierwszych gier komputerowych 3D [LaM95].

3.1.1. Rekursywne śledzenie promieni

Rekursywne śledzenie promieni (ang. Recursive Ray Tracing) jest metodą renderingu rozwijającą prostą ideę rzutowania promieni o śledzenie promieni wtórnych w przypadku trafienia promienia w obiekty zwierciadlane i refrakcyjne (algorytm 3.1). Metoda została po raz pierwszy przedstawiona w 1980 roku przez Turnera Whitteda [Whi80].

Na rysunku 3.2 zobrazowano przykładowy przebieg rekursywnego śledzenia promieni dla trzech promieni pierwotnych wyprowadzonych z pozycji wirtualnej kamery:

- pierwszy promień trafia w matową powierzchnię podłoża w punkcie A, następuje wypuszczenie promienia cienia, służącego określeni widoczności światła w rozpatrywanym punkcie przecięcia promienia z geometrią i obliczenie koloru piksela odpowiadającego śledzonemu promieniowi, na podstawie przyjętego modelu oświetlenia Phong'a (rozdział 2.6).
- drugi promień pierwotny trafia w dużą sferę o właściwościach refrakcyjnych, więc oprócz wypuszczenia promienia cienia z punktu przecięcia wypuszczany jest promień wtórny (załamany). Ten promień przechodzi przez sferę i ponownie ulega załamaniu (promień cienia jest blokowany przez samą sferę). Po opuszczeniu sfery promień trafia w matową powierzchnię sceny w punkcie B, jednak punkt przecięcia nie jest oświetlony przez źródło światła, gdyż promień cienia wyprowadzony z tego punktu trafia w małą sferę. Zatem pikselowi przypisywany jest kolor obliczony z modelu oświetlenia Phong'a ze współczynnikami odbicia rozproszonego i zwierciadlanego przeskalowanymi o wartość współczynnika przesłaniania małej sfery.
- trzeci promień pierwotny trafia w małą sferę o właściwościach zwierciadlanych, zatem generowany jest promień wtórny (odbity), który jednak nie przecina się z żadnym obiektem geometrycznym w scenie i na tym kończy się śledzenie promieni dla tego piksela, a do obliczonego z modelu Phong'a koloru piksela w punkcie przecięcia promienia pierwotnego ze sferą dodawany jest jest kolor tła.



Rys. 3.2. Schemat rekursywnego śledzenia promieni: promień 1 trafia w powierzchnię matową, promień 2 w sferę o właściwościach refrakcyjnych, promień 3 w sferę odbijającą zwierciadlanie; liniami przerywanymi zaznaczono promienie cienia (ilustracja autora)

Uwzględniając sytuację gdy w scenie znajduje się więcej niż jeden obiekt o właściwościach zwierciadlanych lub refrakcyjnych, należy zdefiniować maksymalną dopuszczalną liczbę odbić promieni wtórnych, aby uniknąć śledzenia promieni w nieskończoność (algorytm 3.1).

Algorytm 3.1 Rekursywne śledzenie promieni.

1. *Dla każdego piksela obrazu (rzutni), z pozycji wirtualnej kamery wyprowadzany jest promień pierwotny przechodzący przez piksel.*
2. *Sprawdzone są kolizje danego promienia ze wszystkimi zdefiniowanymi w scenie prymitywami geometrycznymi:*
 - a) *jeśli znaleziono punkty przecięcia promienia wybierany jest ten, który znajduje się najbliżej kamery i przechodzimy do punktu 3.*
 - b) *jeśli nie znaleziono punktu przecięcia z żadnym obiektem geometrycznym sceny do aktualnego koloru piksela dodawany jest kolor tła i następuje przejście do punktu 5 algorytmu.*
3. *Ze znalezionego punktu przecięcia prowadzone są promienie cienia do wszystkich źródeł światła w scenie i sprawdzane jest czy przecinają one inne obiekty geometryczne sceny:*
 - a) *jeśli promień cienia, prowadzony do danego źródła światła przecina obiekty geometryczne, następuje obliczenie w jakim stopniu światło jest blokowane przez powierzchnie przezroczyste i nieprzezroczyste, i na tej podstawie zachodzi skalowanie współczynników odbicia rozproszonego oraz zwierciadlanego i obliczenie koloru piksela dla natężenia tego źródła światła zgodnie z modelem Phong.*
 - b) *jeśli promień cienia, prowadzony do danego źródła światła, nie przetnie na swej drodze żadnego innego obiektu geometrycznego sceny, wówczas obliczany jest kolor piksela dla natężenia tego źródła zgodnie z modelem oświetlenia Phong.*
4. *Sprawdzone jest czy osiągnięto przyjętą maksymalną głębokość rekurencji dla promieni wtórnych :*
 - a) *jeśli tak, następuje przejście do punktu 5 algorytmu.*

b) jeśli nie, sprawdzane jest czy obiekt odbija lub załamuje światło:

- jeśli tak wysyłane są promienie wtórne odbite (zgodnie z prawem odbicia) lub załamane (zgodnie z prawem Snella), dla których relizowany jest punkt 2 algorytmu. Obliczone wartości kolorów dla wysłanych promieni wtórnych po przeskalowaniu przez odpowiednio współczynnik odbicia lub załamania są dodawane do koloru piksela.

– jeśli nie, następuje przejście do punktu 5 algorytmu.

5. *Jeśli aktualnie analizowany promień był:*

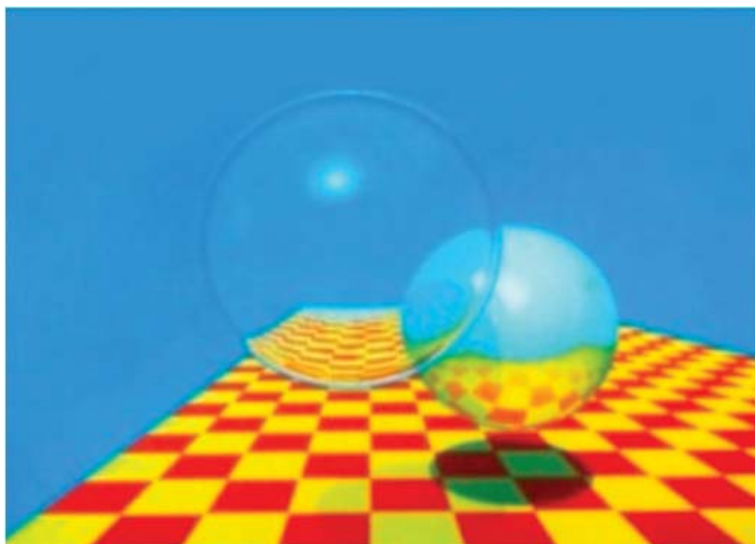
a) promieniem pierwotnym, następuje zakończenie śledzenia promieni dla aktualnie rozpatrywanego piksela obrazu.

b) promieniem wtórnym, następuje powrót do wyższego poziomu rekurencji.

W rzeczywistości gdy światło pada na granicę dwóch ośrodków możliwe jest jednocześnie odbicie i załamanie, opisane za pomocą równań Fresnela [Gre06]. Dla uproszczenia obliczeń w silniku renderującym niekiedy przyjmowane jest założenie, że powierzchnia obiektu w zależności od zdefiniowanego parametru materiału jest albo całkowicie zwierciadlana albo całkowicie refrakcyjna.

Metoda rekursywnego śledzenia promieni pozwoliła na znaczący wzrost jakości wizualnej generowanych obrazów, jednakże kosztem poważnego wydłużenia czasu obliczeń, w porównaniu do rzutowania promieni z powodu konieczności wielokrotnego testowania przecięć promieni wtórnych. W celu przyspieszenia procedury testowania przecięć stosowane są podziały przestrzeni w postaci drzew ósemkowych (ang. octtree) [Gla84], drzew BSP [Sun92], lub hierarchicznych brył otaczających (ang. Bounding Volume Hierarchies, BVH) [Kay86], które pozwalają automatycznie redukować liczbę sprawdzanych obiektów o te, które znajdują się w nierozpatrywanych obszarach sceny.

Rekursywne śledzenie promieni umożliwia uzyskanie szeregu efektów: dokładne cienie, odbicia zwierciadlane, przenikanie przez powierzchnie przezroczyste, refrakcja (rys. 3.3). Niestety metoda nie potrafi symulować oświetlenia pośredniego odbitego od powierzchni dyfuzyjnych, przenikania barw na powierzchniach sąsiadujących oraz zjawisk kaustycznych, dlatego nie jest przez wszystkich badaczy uznawana za metodę globalnego oświetlenia [Wal01], jakkolwiek stanowi punkt wyjściowy dla następnych metod opisanych w niniejszym rozdziale.



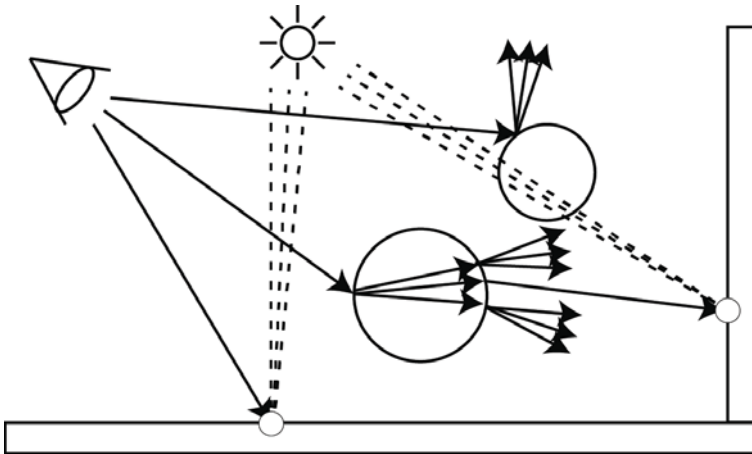
Rys. 3.3. Obraz otrzymany rekursywną metodą śledzenia promieni [Whi80]

3.1.2. Rozproszone śledzenie promieni

Obrazy uzyskane za pomocą metody śledzenia promieni charakteryzują się ostrymi krawędziami obiektów i cieni, które szczególnie w przypadku powierzchni zakrzywionych uwidaczniają artefakty w postaci aliasingu [Shi03]. Jest to wynikiem prowadzenia przez każdy piksel obrazu tylko jednego promienia, który w przypadku napotkania obiektów refrakcyjnych lub zwierciadlanych generuje pojedynczy promień wtórny [Gla89].

Metoda rozproszonego śledzenia promieni (ang. Distributed Ray Tracing) jest modyfikacją rekursywnego śledzenia promieni polegającą na wysyłaniu większej liczby promieni próbkujących (ang. oversampling) [Coo84]. Ponieważ kierunki dodatkowych promieni wyznaczone są w sposób losowy w niewielkim kącie bryłowym wokół promienia wtórnego, metodę tę często określa się też mianem stochastycznego śledzenia promieni (ang. Stochastic Ray Tracing). Finalna wartość koloru piksela jest uśredniana z wartości wyznaczonych dla poszczególnych promieni. W ten sposób możliwa jest redukcja aliasingu na renderowanych obrazach oraz uzyskanie efektów takich jak głębia ostrości, miękkie cienie i rozmycie ruchu, nieosiągalnych za pomocą metody śledzenia promieni zaproponowanej przez Whitteda [Whi80].

Jedynie idealnie zwierciadlane powierzchnie powodują powstawanie wyraźnych odbić, w rzeczywistości większość powierzchni odbijających światło generuje odbicia rozmyte (ang. fuzzy reflections). Rozproszone śledzenie promieni umożliwia uzyskanie takiego efektu przez wypuszczenie wielu promieni wtórnych zamiast jednego, w przypadku napotkania powierzchni odbijającej lub załamującej światło (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Schemat rozproszonego śledzenia promieni: powierzchnie płaskie rozpraszają światło, mniejsza sfera odbija światło, większa sfera ma właściwości refrakcyjne; linią przerywaną oznaczono promień cienia (ilustracja autora)

Aby uniknąć powstawania ostrych krawędzi cieni, w momencie przecięcia przez śledzony promień powierzchni dyfuzyjnej w kierunku powierzchniowego źródła światła wypuszczanych jest wiele promieni cienia. Punktowy model światła jest tutaj zastępowany światłem powierzchniowym, które w uproszczeniu może być traktowane jako zestaw światel punktowych [Shi03].

Procedura śledzenia promieni proponowana przez Whitteda generuje obrazy z nieskończoną głębią ostrości (ang. depth of field). Oznacza, to że wszystkie obiekty sceny niezależnie od odległości względem kamery są jednakowo wyraźne. W rzeczywistości oko ludzkie, tak samo jak obiektyw aparatu posiada soczewkę, która powoduje załamanie części przechodzących przez nią promieni światła. W rezultacie tylko obiekty znajdujące się w płaszczyźnie wyznaczonej przez punkt skupienia soczewki pozostają ostre. Rozproszone śledzenie promieni pozwala generować obrazy z ograniczoną głębią ostrości za pomocą modelu wirtualnej soczewki ustawionego przed rzutnią. Finalny kolor danego piksela jest uśredniany na podstawie wartości obliczonych dla ustalonej liczby promieni wypuszczonych przez ten sam piksel rzutni i załamanych po przejściu przez soczewkę.

W przypadku animowanych scen z poruszającymi się obiektami, promienie próbujące dla jednego piksela mogą być wysyłane w określonym interwale czasowym, umożliwiając tym samym odtworzenie efektu rozmycia ruchu (ang. motion blur) (rys. 3.5).

Metoda rozproszonego śledzenia promieni jest bardzo kosztowna obliczeniowo, ponieważ każdy ze śledzonych promieni pierwotnych po natrafieniu na powierzchnię refrakcyjną lub zwierciadlaną może generować ustaloną liczbę promie-

ni wtórnych, z których każdy może ulegać ponownemu wielokrotnemu odbiciu lub załamaniu generując kolejne promienie wtórne. Zatem liczba dodatkowo generowanych promieni wtórnych rośnie wykładniczo [Suf07].



Rys. 3.5. Obraz wyrenderowany za pomocą rozproszonego śledzenia promieni z widocznym efektem rozmycia ruchu [Coo84]

3.1.3. Śledzenie ścieżek

Metoda śledzenia ścieżek (ang. Path Tracing) została zaprezentowana w 1986 roku przez Jamesa Kajiya [Kaj86] jako technika umożliwiająca numeryczne rozwiązywanie równania renderingu (3.1).

$$L(x, \omega) = L_e(x, \omega) + L_r(x, \omega), \quad (3.1)$$

gdzie:

$L(x, \omega)$ – radiancja światła w dowolnym punkcie x geometrii, obserwowana w kierunku ω ,

$L_e(x, \omega)$ – radiancja światła wyemitowanego z punktu x w kierunku ω ,

$L_r(x, \omega)$ – radiancja światła odbitego z punktu x w rozpatrywanym kierunku ω ,

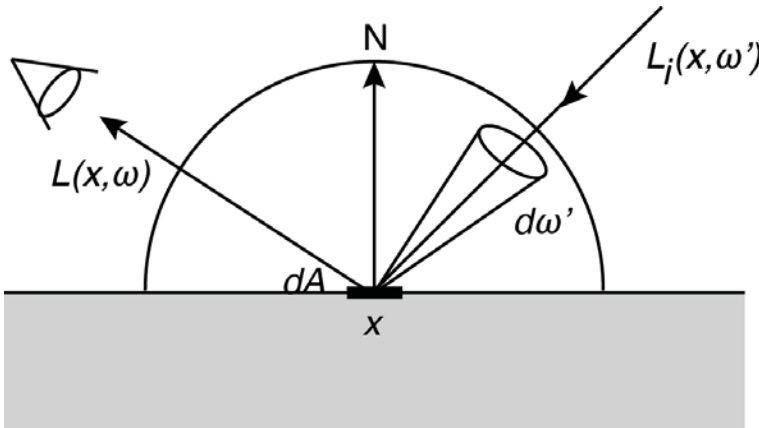
Podstawiając do równania (3.1) $L_r(x, \omega)$ wyprowadzone z równania (2.10) i biorąc pod uwagę, że jest to odbicie światła, które mogło dotrzeć do punktu x z wielu kierunków ω' (rys. 3.6), otrzymuje się następujące równanie:

$$L(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega) L_i(x, \omega') |\omega' \cdot N| d\omega' \quad (3.2)$$

W równaniu (3.2) funkcja BRDF $f_r(x, \omega', \omega)$, kierunki ω' oraz wektor normalny N są znane, natomiast niewiadomymi są radiancja $L(x, \omega)$ i radiancja $L_i(x, \omega')$. W próżni wartość radiancji w wybranym kierunku jest stała wzdłuż całej drogi promieniowania światła. Stąd:

$$L_i(x, \omega') = L(x, \omega') \quad (3.3)$$

Wykorzystując właściwość (3.3) w (3.2) otrzymuje się równanie rekurencyjne, które można rozwiązać metodą niejawną.



Rys. 3.6. Ilustracja równania renderingu (3.2) (ilustracja autora)

Całkowanie w równaniu (3.2) odbywa się po kierunkach hemisfery rozpiętej nad rozpatrywanym punktem x . Szybkość konwergencji standardowych metod numerycznych całkowania (np. całkowanie trapezowe) dla funkcji nieciągłych, a taka jest zwykle funkcja podcałkowa z równania (3.2), jest mała [McQ03]. Z tego powodu równanie renderingu jest rozwiązywane za pomocą metody Monte Carlo, której szybkość konwergencji nie zależy od wymiaru ani ciągłości całkowanych funkcji. Metoda Monte Carlo stosuje losowe próbkowanie wartości w celu oszacowania wartości całki [Arv03]. Aby wyznaczyć radiancję oświetlenia pośredniego w danym punkcie x wystarczy obliczyć oświetlenie z wybranych losowo kierunków hemisfery otaczającej punkt x [Jen01a].

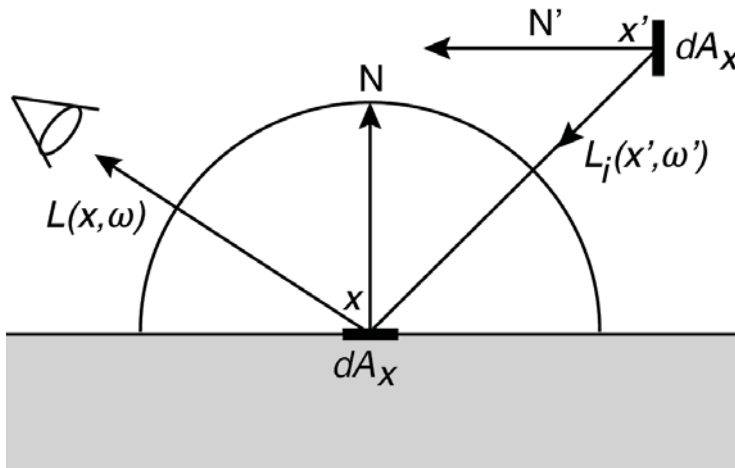
Funkcję BRDF można całkować po powierzchni S półsfery oświetlenia zamiast po kierunkach ω' . W praktyce interesujące są płaty świecących powierzchni. Wtedy równanie renderingu przyjmuje następującą postać (rys. 3.7):

$$L(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_S f_r(x, \omega', \omega) L_i(x', \omega') G(x, x') V(x, x') dA_{x'}, \quad (3.4)$$

gdzie:

- $L(x, \omega)$ – radiancja światła w dowolnym punkcie x geometrii, obserwowana w kierunku ω ,
- $L_e(x, \omega)$ – radiancja światła wyemitowanego z punktu x w kierunku ω ,
- $f_r(x, \omega', \omega)$ – funkcja BRDF w punkcie x określająca ile energii docierającej z kierunku ω' , zostanie odbite w kierunku ω ,
- $L_i(x', \omega')$ – radiancja powierzchni świecącej $dA_{x'}$ w kierunku ω' ,
- $V(x, x')$ – funkcja widoczności; $V = 0$ jeśli między punktami x i x' znajduje się powierzchnia blokująca światło, w przeciwnym wypadku $V = 1$,
- $G(x, x')$ – funkcja opisująca relacje geometryczne między punktami x i x' , ma postać:

$$G(x, x') = \frac{|\omega' \cdot N| |\omega' \cdot N'|}{\|x - x'\|^2} \quad (3.5)$$



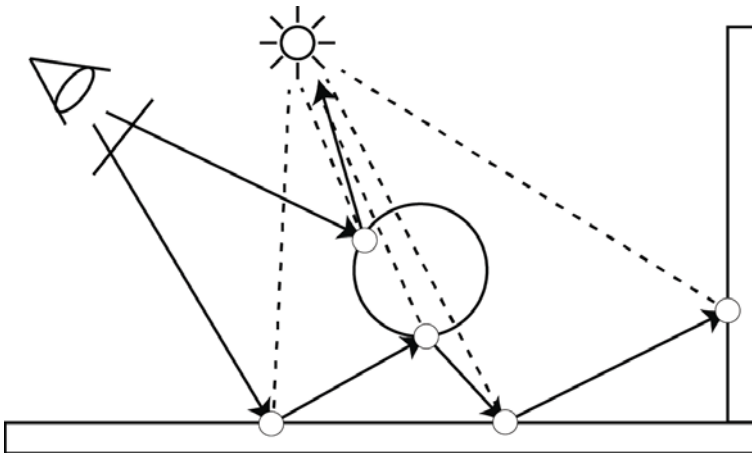
Rys. 3.7. Ilustracja równania renderingu (3.4) (ilustracja autora)

Jeśli płyty świecących powierzchni należą do źródła światła to radiancje $L_i(x', \omega')$ są znane i równe radiancji tych źródeł. Równanie (3.4) można wtedy rozwiązać metodą jawną.

Metoda śledzenia ścieżek stanowi rozszerzenie idei rozproszonego śledzenia promieni przez wprowadzenie możliwości dodatkowego, wielokrotnego odbicia śledzonych promieni od powierzchni dyfuzyjnych w celu oszacowania oświetlenia pośredniego, które jest obliczane z równania (3.2). Mając na względzie propagację światła w naturze, ścieżki światła powinny rozpoczynać się w pozycjach źródeł swia-

tła. Jednakże w praktyce tylko niewielka część promieni śledzonych ścieżek trafiłaby ostatecznie w pozycję wirtualnej kamery przyczyniając się do obliczenia wartości radiancji. Z tego powodu metoda śledzenia ścieżek zakłada odwrócenie kierunku promieni, które są emitowane z pozycji kamery. Jeśli jakaś ścieżka dotrze do źródła światła, to emisja tego źródła wniesie wkład do radiancji punktu x . Sceny zawierają z reguły niewiele źródeł światła, zwykle o niewielkich rozmiarach lub światła punktowych. Dlatego prawdopodobieństwo, że ścieżka dotrze do źródła światła w akceptowalnym czasie obliczeń jest niewielkie. Z tego względu korzystając z równania (3.4) w sposób jawny testuje się źródła światła przy pomocy promieni cienia wypuszczanych z każdego punktu przecięcia ścieżki z geometrią sceny. Jeśli promień cienia nie napotka na swej drodze żadnej powierzchni blokującej światło emitowane przez źródło, to emisja źródła (L_e) wnosi wkład do radiancji obserwowanego punktu x . Liczba odbić promieni tworzących ścieżkę jest regulowana zgodnie z mechanizmem rosyjskiej ruletki (ang. Russian Roulette) [Gla95].

Przez wzgląd na rekursywny charakter algorytmu, zwiększenie liczby promieni wtórnych po każdym zderzeniu z powierzchnią dyfuzyjną w celu zmniejszenia błędu estymacji radiancji powodowałoby wykładniczy wzrost obliczeń. Kajiya zauważył, że największy wpływ na oszacowanie finalnej radiancji dla rozpatrywanego piksela obrazu mają radiancje cząstkowe obliczone w pierwszych znalezionych punktach przecięcia promieni wychodzących z kamery z geometrią. Dlatego z każdego znalezionego punktu przecięcia ścieżki z geometrią generowany jest tylko jeden promień wtórny, za to przez każdy piksel obrazu wyprowadzanych jest wiele promieni pierwotnych tworzących wiele ścieżek. Przykładowy przebieg dwóch ścieżek dla jednego piksela obrazu ilustruje rysunek 3.8.



Rys. 3.8. Schemat śledzenia ścieżek: dwie ścieżki wyprowadzone dla jednego piksela obrazu oznaczono linią ciągłą, linią przerywaną oznaczono promienie cienia prowadzone z punktów ścieżki do źródła światła, powierzchnie płaskie są rozpraszające, sfera odbija zwierciadlanie (ilustracja autora)

Obrazy generowane za pomocą metody śledzenia ścieżek obarczone są szumem o wysokiej częstotliwości wynikającym ze zbyt małej dla dokładnego oszacowania radiancji liczby śledzonych ścieżek [Guz11b]. Jedną ze stosowanych metod redukcji szumu jest również kierowanie odbić promieni wtórnych w stronę obszarów sceny istotnych dla jakości generowanych obrazów [Pha10].

Metoda śledzenia ścieżek pozwala uzyskać wszystkie efekty generowane za pomocą rozproszonego śledzenia promieni (miękkie cienie, głębię ostrości, rozmycie ruchu), a ponadto umożliwia uzyskanie efektów kaustycznych (rys. 3.9).



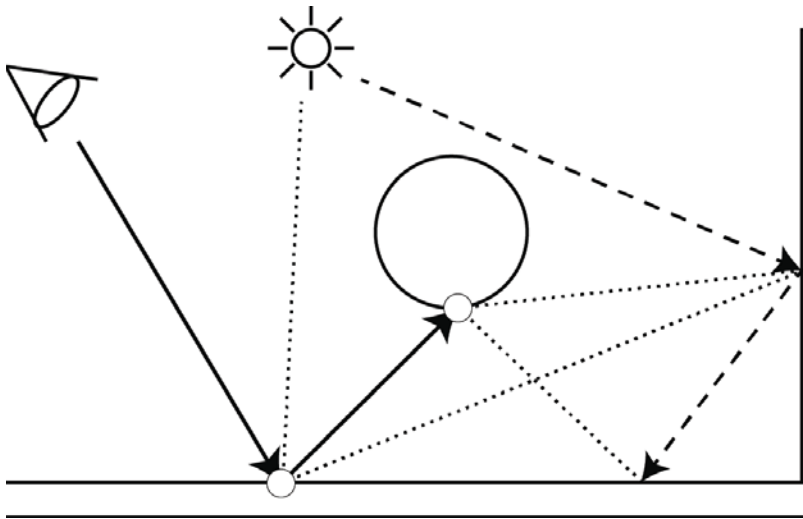
Rys. 3.9. Scena testowa wyrenderowana za pomocą metody śledzenia ścieżek z widocznym efektem kaustycznym generowanym przez zielone kule oraz efektem przenikania kolorów sąsiadujących powierzchni [Kaj86]

3.1.4. Dwukierunkowe śledzenie ścieżek

W przypadku scen oświetlonych głównie światłem pośrednim, a więc takich gdzie większość źródeł światła nie jest bezpośrednio widoczna z powierzchni odbijających promienie, śledzenie ścieżek wychodzących z pozycji kamery jest mało efektywne, gdyż wymaga większej liczby odbić promieni wtórnych na drodze do źródła światła. Ponadto duża część powierzchni znajduje się wówczas w cieniu, przyczyniając się tym samym w niewielkim stopniu do oszacowania radiancji.

Rozwiązanie tego problemu zostało zaproponowane niezależnie przez Lafortune'a i Willemsa w 1993 roku [Laf93] oraz Veach'a i Guibas'a w 1994 roku [Vea94].

Metoda, nazwana dwukierunkowym śledzeniem ścieżek (ang. Bi-Directional Path Tracing), polega na łączeniu ścieżek wyprowadzonych zarówno z kamery jak i ze źródła światła. Każdy punkt przecięcia na ścieżce promieni wypuszczonych ze źródła światła jest również traktowany jako źródło światła. Wobec powyższego, jedyna modyfikacja względem algorytmu śledzenia ścieżek, oprócz uprzedniej propagacji dodatkowych ścieżek ze źródła światła, polega na poprowadzeniu promieni sprawdzających oświetlenie dla punktów ścieżki wyprowadzonej z kamery nie tylko do wszystkich źródeł światła w scenie ale również do wszystkich wyznaczonych punktów przecięcia z geometrią dla ścieżki światła (rys. 3.10).



Rys. 3.10 Schemat dwukierunkowego śledzenia ścieżek. Linią ciągłą oznaczono ścieżkę wyprowadzoną z kamery, linią kreskową oznaczono ścieżkę wyprowadzoną ze źródła światła, linią kropkowaną oznaczono połączenia obu ścieżek (ilustracja autora).

W większości wypadków algorytm dwukierunkowego śledzenia ścieżek wymaga sprawdzenia mniejszej liczby ścieżek niż algorytm śledzenia ścieżek, ponieważ ścieżki światła przekazują dodatkowe informacje o oświetleniu sceny. Z tego samego powodu łatwiej uzyskujemy efekty kaustyczne (rys. 3.11). Jednakże algorytm śledzenia ścieżek w dalszym ciągu może być szybszy przez wzgląd na konieczność generowania dodatkowych ścieżek światła w metodzie dwukierunkowej.

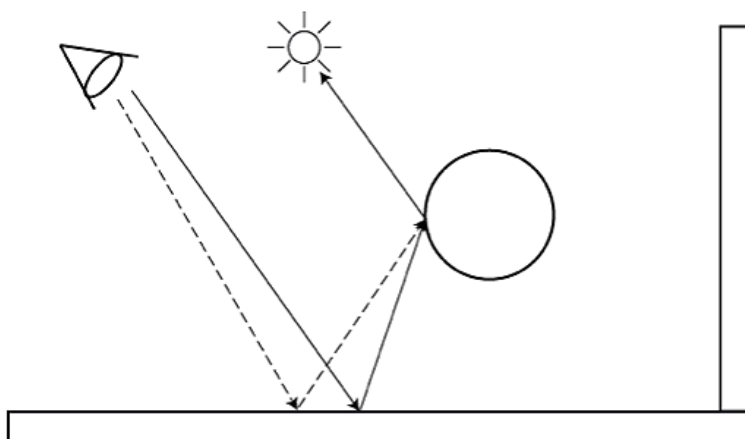
Metoda dwukierunkowego śledzenia ścieżek wymaga testowania wielu przecięć dla promieni łączących punkty na ścieżkach wychodzących z kamery i ze źródeł światła. Istnieje możliwość zredukowania liczby połączeń przy zachowaniu losowości próbkowania za pomocą mechanizmu rosyjskiej ruletki [Gla95].



Rys. 3.11. Obrazy wyrenderowane w tym samym czasie za pomocą dwukierunkowego śledzenia ścieżek dla 25 próbek na piksel (po lewej) oraz śledzenia ścieżek dla 56 próbek na piksel (po prawej) [Vea95]

3.1.5. Metropolis Light Transport

Mankamentem metod opartych na mechanizmie śledzenia ścieżek jest szum pojawiający na renderowanych obrazach w przypadku niewystarczającej liczby śledzonych ścieżek. W roku 1997 Veach i Guibas zaproponowali metodę generowania fotorealistycznych obrazów opartą na algorytmie Metropolis [Vea97]. Metoda Metropolis Light Transport konstruuje dla każdego piksela obrazu ścieżkę promieni z wykorzystaniem algorytmu dwukierunkowego śledzenia promieni, a następnie dokonuje mutacji ścieżki przez wyznaczenie nowych punktów pośrednich (rys. 3.12).



Rys. 3.12. Schemat mutacji ścieżki w metodzie Metropolis Light Transport. Linia ciągłą oznaczono pierwotny przebieg ścieżki, linią przerywaną oznaczono ścieżkę zmutowaną [Guz12a]

Każda generowana mutacja jest akceptowana lub odrzucana w oparciu o wyznaczony współczynnik prawdopodobieństwa, aby zachować losowość próbkowania obliczanego rozkładu oświetlenia w scenie [Vea97]. Wynikowy kolor piksela jest wyliczany na podstawie uśrednionej wartości radiancji obliczonej dla wielu zmutowanych ścieżek.

Zaletą metody jest to, że działa ona lokalnie - dokonywana jest jedna lub dwie modyfikacje promieni - tzw. zaburzenia soczewki (ang. lens perturbation) lub zaburzenia kaustyki (ang. caustic perturbation) [Vea97]. Dzięki temu koszt czasowy wyznaczenia mutacji ścieżki jest relatywnie niewielki. Gdy zostanie znaleziona ścieżka od kamery do źródła światła, która w znaczny sposób przyczynia się do rozświetlenia sceny, eksplorowane jest jej najbliższe otoczenie. W ten sposób uwydatniane są m.in. efekty kaustyczne. Metoda Metropolis Light Transport sprawdza się szczególnie w przypadku scen z oświetleniem pośrednim generując obrazy z mniejszym szumem w tym samym czasie co metoda dwukierunkowego śledzenia promieni (rys. 3.13).

a)



b)



Rys. 3.13. Obrazy wyrenderowane w tym samym czasie za pomocą dwukierunkowego śledzenia ścieżek dla 40 ścieżek na piksel (a) oraz za pomocą Metropolis Light Transport dla średnio 250 mutacji ścieżki na piksel (b) [Vea97]

3.2. Metoda energetyczna

W 1984 roku naukowcy z Cornell University zaproponowali zastosowanie metody energetycznej (ang. Radiosity), wywodzącej się z inżynierii termicznej i badań nad promieniowaniem cieplnym [Sie81], w celu wyznaczenia globalnego rozkładu oświetlenia [Gor84]. Rozkład oświetlenia można opisać za pomocą równań bilansu energetycznego (3.6) przy założeniu, że scena jest zamknięta i cała energia wyemitowana przez powierzchnię źródeł światła dociera do pozostałych powierzchni przez które jest absorbowana lub odbijana [Gor84] [Coh93].

$$M_i = M_{ei}dA_i + \rho_i \int_j M_j F_{ij}dA_j, \quad (3.6)$$

gdzie:

M_i – gęstość strumienia światła (emitancja) opuszczającej elementarną powierzchnię i ,

dA_i – elementarna powierzchnia i ,

M_{ei} – emitancja związana ze strumieniem emitowanym przez powierzchnię i ,

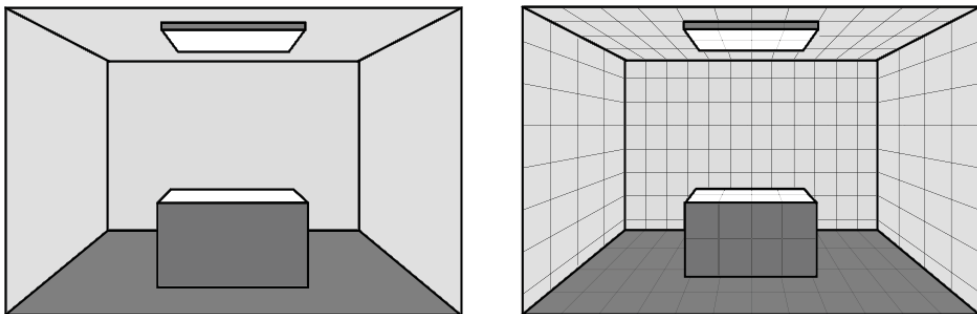
ρ_i – zdolność odbijania światła przez elementarną powierzchnię i ,

M_j – gęstość strumienia światła opuszczającej elementarną powierzchnię j ,

dA_j – elementarna powierzchnia j ,

F_{ij} – współczynnik sprzężenia między elementarną powierzchnią i oraz j .

Aby rozwiązać układ równań bilansu energetycznego należy podzielić geometrię sceny na skończoną liczbę elementarnych powierzchni (trójkątów lub czworokątów) zwanych płacami (rys. 3.14) [Hec91], [Coh93].



Rys. 3.14. Podział geometrii sceny na płaty [Ash94a]

Każdy płat ma określony współczynnik pochłaniania światła. Jeśli jego wartość jest dodatnia, wtedy płat pochłania część docierającego do niego światła, a resztę odbija. Jeśli jego wartość jest ujemna, wtedy płat emituje światło. Zgodnie z zasadą

zachowania energii światło opuszczające płat jest sumą światła emitowanego przez płat i światła odbijanego przez płat.

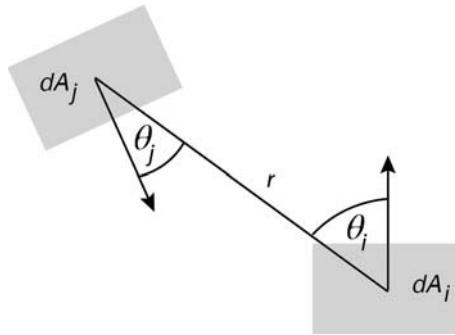
Wartość współczynnika sprzężenia F_{ij} zależy od odległości pomiędzy płatami, wzajemnej orientacji płatów (rys. 3.15) oraz ewentualnego częściowego bądź całkowitego przesłonięcia przez inne płaty, natomiast nie zależy od długości fali świetlnej. Dla uproszczenia obliczeń metoda zakłada, że emisja i odbicia światła mają charakter idealnie rozproszony, zaś płaty powierzchni źródeł światła mają stałą wartość emitalcji. Przy powyższych założeniach współczynnik sprzężenia F_{ij} można obliczyć ze wzoru:

$$F_{ij} = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j, \quad (3.7)$$

gdzie:

r – odległość między płatami,

θ_i, θ_j – kąty pomiędzy wektorami normalnymi a odcinkiem łączącym środki płatów.



Rys. 3.15. Ilustracja współczynnika sprzężenia pomiędzy płatami (ilustracja własna)

Ideą metody energetycznej jest obliczenie emitalcji dla wszystkich płatów składowych geometrii sceny a następnie użycie ich do cieniowania w procesie renderingu. Algorytm metody energetycznej można podzielić na cztery etapy:

Algorytm 3.2 Rendering obrazu za pomocą metody energetycznej.

1. **Dyskretyzacja geometrii sceny według wybranego algorytmu.**

– podział regularny (ang. *regular subdivision*) - najprostszy do zaimplementowania dla powierzchni prostokątnych, jednakże dokładne rezultaty wymagają bardzo dużego stopnia podziału.

– podział adaptacyjny (ang. *adaptive subdivision*) - daje zdecydowanie lepsze rezultaty niż podział regularny, gdyż zagęszczenie płatów jest dostosowane do złożoności sceny.

2. **Wyznaczenie współczynników sprzężenia między płatami.**

Dla każdej pary płatów w scenie obliczany jest współczynnik sprzężenia, który określa jaka część całej energii światła wychodzącej z pierwszego płata dociera do drugiego płata. Do obliczania współczynników sprzężenia konieczne jest zastosowanie metod numerycznych (np. metoda Nusselta z wykorzystaniem jednostkowej półkuli, metoda Cohena-Greenberga z wykorzystaniem półsześcianu) [Ash94a].

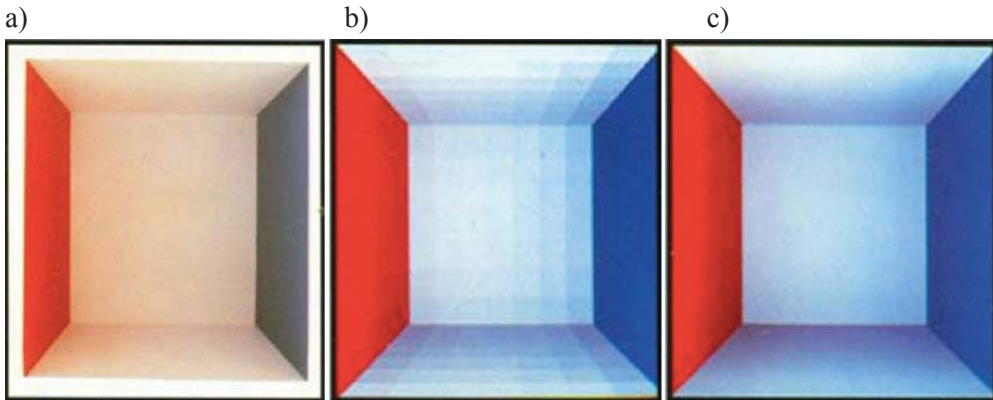
3. **Obliczenie emitancji każdego z płatów.**

Zakładając, że scena składa się z nieskończenie małych powierzchni dA , dla każdego płatu wybierany jest punkt w którym określana będzie dyskretna wartość emitancji całego płatu. Wartości te są traktowane jako skończony zbiór n niewiadomych w liniowym układzie n równań bilansu energetycznego. Aby wyznaczyć energię otrzymaną przez i -ty odbiornik od dowolnego j -tego nadajnika, należy przeskalować energię tego nadajnika przez współczynnik sprzężenia F_{ij} . Równania bilansu energetycznego muszą być rozwiązane dla każdego zakresu długości fal świetlnych oddzielnie, gdyż wartości Q_i zależą od długości fali światła. W praktyce rozwiązuje się je najczęściej dla trzech składowych modelu barw (R,G,B).

4. **Rendering z użyciem aktualnej kamery.**

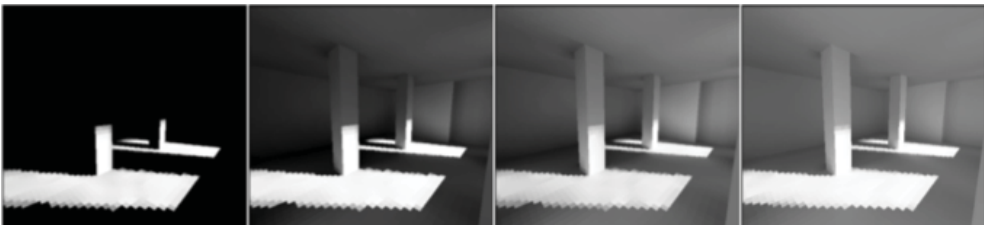
Przyjmując, że wyznaczona w poprzednim etapie emitancja każdego płata jest wartością natężenia oświetlenia w modelu Phong'a, można dokonać renderingu sceny z dowolnego położenia wirtualnej kamery w scenie stosując cieniowanie płaskie. Dla zwiększenia realizmu można na podstawie rozkładu emitancji dla sąsiadujących płatów obliczyć rozkład emitancji w wierzchołkach płatów, a następnie w wyniku interpolacji dwuliniowej dla punktów wewnątrz płata wykonać cieniowanie Gourauda [Gou71].

Pierwsze algorytmy radiosity były ograniczone do scen, w których wszystkie powierzchnie były wzajemnie widoczne. Porównanie obrazu sceny testowej wygenerowanej za pomocą metody energetycznej z fotografią rzeczywistej sceny przedstawiono na rysunku 3.16. W późniejszych latach zmodyfikowano algorytm uwzględniając przesłanianie obiektów i tym samym umożliwiając rendering złożonych scen geometrycznych [Coh85] oraz poprawiono wydajność algorytmu poprzez hierarchiczny podział otoczenia [Coh86]. W roku 1987 Rushmeier rozbudował podstawowy algorytm radiosity uwzględniając specyfikę medium, w którym zachodzi transfer energii (np. dym, mgła) [Rus87].



Rys. 3.16. a) fotografia rzeczywistego modelu sceny testowej (Cornell Box) b) rendering wirtualnego modelu za pomocą algorytmu radiosity (49 płatów na ścianę) z cieniowaniem stałą wartością, c) rendering wirtualnego modelu za pomocą algorytmu radiosity (49 płatów na ścianę) z interpolacją [Gor84]

W 1988 roku Cohen, Chen, Wallace i Greenberg przedstawili modyfikację metody energetycznej polegającą na progresywnym polepszaniu (ang. progressive refinement) [Coh88]. Zadaniem metody jest cykliczne rozprowadzenie w scenie energii, którą na początku posiadają źródła światła. W każdej iteracji energię emituje tylko jeden płat, który posiada aktualnie najwięcej energii. Proces kontynuowany jest aż do wyemitowania przez wszystkie źródła światła założonej wartości energii (rys. 3.17). Przeprowadzone testy wykazały, że dla przykładowej sceny składającej się z 500 płatów i 7000 elementów akceptowalny obraz uzyskano po 100 krokach metodą progresywnego polepszania, podczas gdy metoda Gaussa-Saidla wykonała w tym czasie zaledwie 20% pierwszej pełnej iteracji [Coh88].



Rys. 3.17. Kolejne iteracje metody progresywnego polepszania, od lewej: 1, 2, 3 i 16. © Hugo Elias

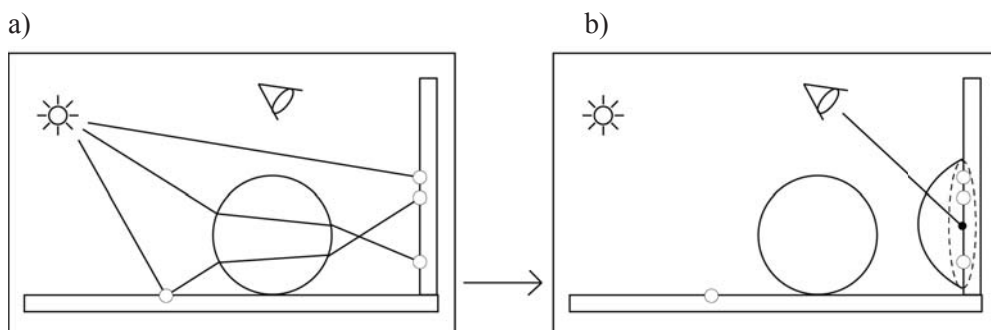
Należy zauważyć, że na uzyskany rozkład oświetlenia wpływa wyłącznie rozmieszczenie obiektów w scenie (źródła światła są traktowane jako geometria emitująca światło). W przeciwieństwie do przedstawionych w rozdziale 3.1 metod bazujących na algorytmie rzucania promieni, obliczenia oświetlenia są niezależne od pozycji i orientacji kamery (ang. view-independent). Dzięki temu dla scen statycznych (geometrie nie zmieniają swojego położenia w scenie) obliczenie rozkładu

oświetlenia wykonywane jest jednorazowo przed pierwszym renderingiem obrazu i może być wielokrotnie wykorzystywane.

Główną wadą metody jest konieczność dostosowywania sceny - podział na płyty i otaczanie geometrią scen otwartych. Złożoność obliczeniowa algorytmu uzależniona jest od liczby płyt w scenie. Sposób i gęstość podziału determinuje jakość uzyskanego obrazu. Metoda energetyczna doskonale sprawdza się przy symulacji oświetlenia pośredniego sceny. Ponieważ źródła światła są powierzchniowe, uzyskujemy realistycznie wyglądające „miękkie” cienie. Z założeń modelu fizycznego, metoda umożliwia jednak uzyskanie odbić zwierciadlanych i załamania światła, a tym samym niemożliwe jest generowanie przy jej pomocy efektów kaustycznych.

3.3. Mapowanie fotonowe

Klasyczna wersja algorytmu mapowania fotonowego (ang. Photon Mapping) [Jen96] zakłada przebieg dwuetapowy (rys. 3.18). Celem pierwszego etapu algorytmu mapowania fotonowego jest określenie oświetlenia pośredniego na powierzchniach rozpraszających. Proces ten można zrealizować w trzech krokach: po pierwsze należy wyemitować ze źródła światła zadaną liczbę fotonów, następnie prześledzić ich drogę w scenie z uwzględnieniem wielokrotnych odbić od różnych rodzajów powierzchni, po trzecie zapisać zebrane dane do przygotowanej struktury danych zwanej mapą fotonową. Drugi etap to rendering sceny za pomocą zmodyfikowanego algorytmu rekursywnego śledzenia promieni, w oparciu o informacje na temat radiancji w danym punkcie geometrii zgromadzone w mapie fotonowej.



Rys. 3.18. Emisja i propagacja fotonów ze źródła światła (a) i rendering (b) (ilustracja autora)

3.3.1. Emisja fotonów ze źródła światła

Fotony powinny zostać wyemitowane ze źródła światła zgodnie ze sposobem emisji charakterystycznym dla danego rodzaju źródła (patrz rozdział 2.4). Dla punktowego źródła fotony będą wystrzelone w scenę równomiernie we wszystkich kie-

runkach. Dla światła kierunkowego wszystkie fotony będą emitowane w tym samym kierunku. Powierzchniowe źródło światła powinno emitować fotony z losowo wybranych punktów powierzchni, w kierunkach ograniczonych przez hemisferę wyznaczoną wektorem normalnym powierzchni. Prawdopodobieństwo emisji w kierunku równoległym do powierzchni źródła powinno być zerowe, najwyższe zaś w kierunku prostopadłym do powierzchni.

Aby zapewnić, że losowo wybierane kierunki emisji fotonów ze źródła punktowego będą równomiernie rozłożone, możemy posłużyć się techniką próbkowania przez odrzucenie (ang. rejection sampling), która w przypadku implementacji wykonanej przez autora sprowadza się do losowania współrzędnych punktu wewnątrz sześcianu okalającego pozycję źródła dopóty, dopóki wylosowany punkt nie znajdzie się wewnątrz sfery jednostkowej (o promieniu równym 1). Wówczas jego współrzędne wyznaczą wektor kierunkowy promienia emisji zaczepionego w pozycji źródła punktowego. Poniżej znajduje się przykładowy pseudokod 3.1 funkcji:

Pseudokod 3.1. Emisja fotonów z punktowego źródła światła.

```
emituj_foton_ze_źródła_punktowego()
{
    ne = 0; // liczba wyemitowanych fotonów
    while( niewystarczająca_liczba_fotonów )
    {
        do
        { // wylosuj współrzędne kierunku emisji nowego fotonu
            x = losowa_wartość_od_minus_1_do_1();
            y = losowa_wartość_od_minus_1_do_1();
            z = losowa_wartość_od_minus_1_do_1();
        } while( x2 + y2 + z2 > 1 )
        // dopóki długość wektora nie będzie mniejsza od jedynki
        d = < x , y , z > // wektor kierunkowy emisji fotonu
        p = pozycja_źródła_punktowego;
        prześledź_foton_wyemitowany_z_pozycji_p_w_kierunku_d();
        ne = ne + 1;
    }
    skaluj_energie_wszystkich_zapisanych_fotonów_przez_ne;
}
```

Warunek „niewystarczająca liczba fotonów” w powyższym pseudokodzie oznacza nie tylko sprawdzenie czy wyemitowano już zadaną liczbę fotonów. W zależności od użytej struktury danych do zapisu ślędzonych fotonów niezbędnym może okazać się również sprawdzenie i ewentualne zaprzestanie dalszej emisji fotonów, gdy mapa fotonowa jest już pełna. Może się tak stać w przypadku zastosowania tablicy o ustalonym odgórnie rozmiarze lub po prostu gdy zarezerwujemy pewien obszar pamięci. Jeśli stosowana jest dynamiczna lista, wówczas nie grozi przepełnienie, ale należy liczyć się z ogromną liczbą danych zapisanych w wyniku propagacji bardzo dużej liczby fotonów.

Natężenie źródła światła powinno być równomiernie rozdzielone pomiędzy wszystkie fotony, aby nie tracić czasu obliczeń na śledzenie fotonów o niewielkim wpływie na oświetlenie sceny. Jeśli podana przez użytkownika energia źródła wynosi E , wówczas początkowa energia każdego z n_f wyemitowanych fotonów powinna być równa:

$$E_f = \frac{E}{n_f}. \quad (3.8)$$

Ponieważ nie zawsze znana jest całkowita liczba wyemitowanych fotonów, dlatego początkowa wartość energii każdego fotonu jest równa energii źródła, natomiast konieczne przeskalowanie energii każdego fotonu zapisanego w mapie wykonywane jest dopiero po zakończeniu propagacji wszystkich fotonów w scenie.

Aby wykorzystać punktowe źródło światła jako jedno ze składowych światła powierzchniowego, należy dodatkowo ograniczyć kierunki emisji fotonów do hemisfery zorientowanej zgodnie z kierunkiem wektora normalnego powierzchni źródła światła. Jeśli scena zawiera więcej niż jedno źródło światła, należy wyemitować fotony ze wszystkich źródeł. Dla późniejszego lepszego oszacowania natężenia oświetlenia w danym punkcie powierzchni, należy zadbać, aby energia pojedynczych fotonów bez względu na źródło pochodzenia, była zbliżona. Oznacza to, że źródła światła o niewielkiej energii powinny emitować mniej fotonów niż źródła o dużej energii.

Po wyemitowaniu wszystkich fotonów z danego źródła (przed przystąpieniem do emisji z następnego źródła), należy przeskalować energię fotonów z tego źródła zapisanych w mapie fotonowej. W tym celu wygodnie jest przechowywać w mapie oprócz licznika aktualnie zapisanych fotonów, również licznik fotonów zapisanych z poprzednich źródeł światła. Scena z wieloma źródłami światła nie wymaga śledzenia większej liczby fotonów dla uzyskania dobrej jakości obrazu. Każde ze źródeł ma wtedy mniejszy wpływ na ostateczny wynik rozkładu natężenia oświetlenia.

W określonych okolicznościach (np. dla uzyskania efektów kaustycznych) istotnym jest wyemitowanie fotonów w ściśle określonym kierunku. W tym celu zastosowano mapy projekcji (ang. projection maps) [Jen95a]. Mapa projekcji to obraz

geometrii sceny widzianej z danego źródła światła, zrzutowany na powierzchnię sferyczną otaczającą źródło punktowe lub płaszczyznę w przypadku źródła kierunkowego. Mapa projekcji może być zapisana w postaci monochromatycznego obrazu, którego piksele przechowują informację o tym czy przechodzące przez nie promienie (wychodzące ze źródła światła) przetną obiekty geometryczne sceny (rys. 3.19). Aby uprościć rzutowanie skomplikowanych geometrycznie obiektów (jednocześnie akceptując utratę dokładności) można rzutować same bryły otaczające obiektów lub ich grup.



Rys. 3.19. Mapa projekcji: kolor biały oznacza piksele, przez które przechodzą promienie emisji fotonów ze źródła światła, które trafiają w obiekt geometryczny sceny; kolor czarny oznacza piksele, przez które przechodzą promienie emisji fotonów ze źródła światła, które nie trafiają w geometrię sceny (ilustracja autora)

Dzięki zastosowaniu map projekcji można określić w kierunku jakiego obiektu mają być emitowane fotony. Pozwala to również oszczędzić czas obliczeń w przypadku scen z niewielką liczbą obiektów geometrycznych, dla których przy równomiernej emisji fotonów ze źródła duża ich część trafiałaby w próżnię. Zastosowanie mapy projekcji wymaga przeskalowania energii poszczególnych fotonów przez proporcje obszarów istotnych do obszaru całej mapy projekcji. W praktyce może wystąpić sytuacja, gdy mapa fotonowa zostanie zapełniona przed wysłaniem fotonów we wszystkich kierunkach przecinających istotne obszary mapy projekcji. Dlatego

alternatywnym rozwiązaniem jest stochastyczne wybieranie kierunku emisji nowego fotonu i dodatkowe sprawdzenie, czy wylosowany wektor kierunkowy przechodzi przez piksel mapy projekcji oznaczony jako istotny. Jeśli nie, losowany jest nowy kierunek.

3.3.2. Propagacja fotonów w scenie

Po wyemitowaniu fotonu ze źródła światła następuje jego śledzenie w scenie. Proces ten określany jest niekiedy w literaturze jako: „light ray tracing”, „backward ray tracing”, „backward path tracing”, ponieważ z algorytmicznego punktu widzenia jedyna różnica względem raytracingu polega na tym, że promienie wzdłuż których poruszają się fotony wysyłane są ze źródła światła zamiast z kamery. Należy jednak zdawać sobie sprawę, że w przeciwieństwie do śledzenia promieni i śledzenia ścieżek, gdzie promienie zbierają radiancję, śledzenie fotonów ma na celu rozpropagowanie energii w scenie. Klasyczna metoda mapowania fotonowego nie uwzględnia rodzaju ośrodka (np. dymu lub mgły) w którym rozchodzą się fotony [Jen01b].

Interakcja fotonu z geometrią zależy od właściwości materiału przypisanego do obiektu, z którym zderza się foton. Foton uderzając w powierzchnię może zostać odbity, załamany lub zaabsorbowany. Można rozróżnić odbicie rozpraszające (ang. diffuse), połyskliwe (ang. specular) i zwierciadlane (ang. mirror). W rzeczywistości, mogą wystąpić po części wszystkie te zjawiska jednocześnie. Oznacza to, że aby uzyskać fizyczną poprawność obliczeń powinniśmy po wykryciu zderzenia fotonu z geometrią rozdzielić jego energię na kilka fotonów wtórnych i dalej śledzić oddzielnie każdy z nich. Liczba obliczeń wzrasta wówczas wykładniczo. Przykładowo jeśli przy każdej interakcji generowane byłyby dwa fotony wtórne (odbity i załamany), to przy dopuszczalnych ośmiu odbiciach w scenie konieczne byłoby już śledzenie 256 fotonów powstałych w wyniku wyemitowania zaledwie jednego fotonu ze źródła. Ponadto energie fotonów powstałych w kolejnych interakcjach są niewielkie i zdecydowanie różnią się od początkowych, przez co w niewielkim stopniu wpływają na późniejszą estymację gęstości energii fotonów przeprowadzaną podczas renderingu.

W związku z powyższym zaproponowano zastosowanie metody probabilistycznej znanej jako rosyjska ruletka (ang. Russian Roulette) [Gla95]. Polega ona na podjęciu decyzji, które zjawisko spośród wymienionych zajdzie w rozpatrywanym momencie, na podstawie wylosowanej wartości z przedziału $[0,1]$ i przypisanych do materiału współczynników prawdopodobieństwa. W najprostszym przypadku można posłużyć się tą metodą w celu ustalenia czy nastąpi odbicie fotonu od powierzchni z którą się zderzył, czy też zostanie on absorbowany, co jest równoważne z jego unicestwieniem (pseudokod 3.2).

Pseudokod 3.2 Realizacja mechanizmu rosyjskiej ruletki.

```

p = prawdopodobieństwo odbicia fotonu dla danego materiału
k = random(); // losowo wybrana wartość z przedziału [0,1]
if (k < p)
    odbij_foton();
else
    absorbuje_foton();

```

Dla uproszczenia obliczeń przyjmuje się, że materiały mogą być całkowicie dyfuzyjne (odbicia rozproszone), lustrzane (odbicia zwierciadlane) lub refrakcyjne (załamanie światła) [Jen96]. Powyższy mechanizm stochastyczny będzie uruchamiany jedynie w momencie zderzenia fotonu z obiektem o materiale dyfuzyjnym. W rezultacie energia odbitego fotonu nie zostaje zmniejszona, natomiast powinna zostać przeskalowana przez współczynnik dyfuzyjny materiału (dla poszczególnych kanałów r, g, b):

$$\begin{aligned}
 E_{d,r} &= E_{i,r} k_{d,r} / k_{d,avg} \\
 E_{d,g} &= E_{i,g} k_{d,g} / k_{d,avg} \\
 E_{d,b} &= E_{i,b} k_{d,b} / k_{d,avg}
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

gdzie:

$$k_{d,avg} = (k_{d,r} + k_{d,g} + k_{d,b}) / 3,$$

$E_{i,r}, E_{i,g}, E_{i,b}$ – energia poszczególnych kanałów r, g, b fotonu przed odbiciem,

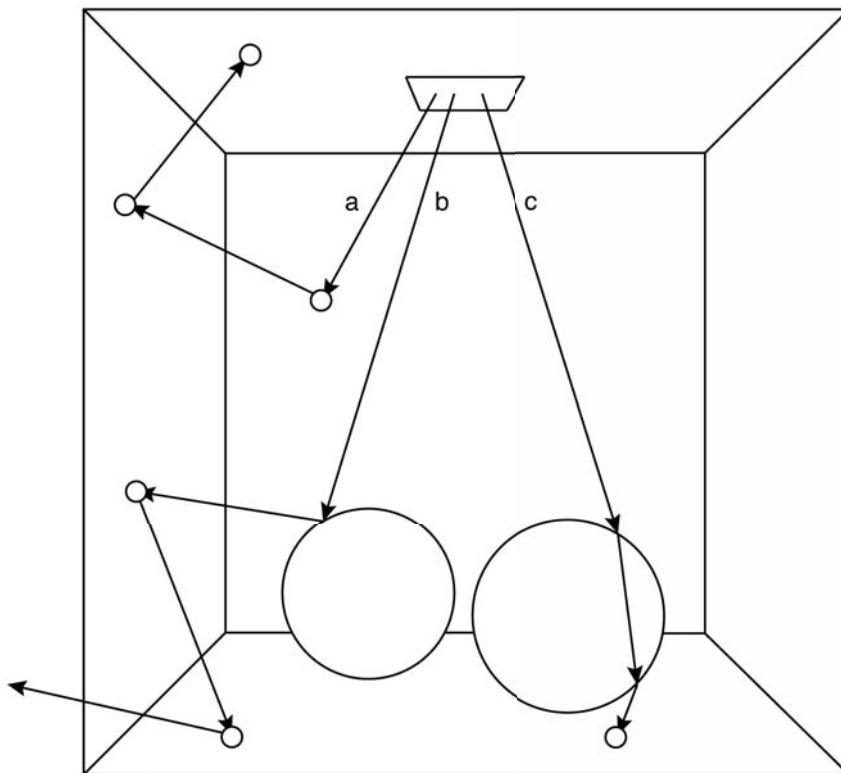
$E_{d,r}, E_{d,g}, E_{d,b}$ – energia poszczególnych kanałów r, g, b fotonu odbitego.

Przykładowo dla 1000 wystrzelonych fotonów, które trafiają w powierzchnię dyfuzyjną o współczynniku prawdopodobieństwa odbicia równym 0,5 otrzymamy 500 fotonów o niezminionej wartości energii. Jest to równoważne 1000 fotonom o połowie początkowej energii. Jednakże koszt potrzebny na ich śledzenie jest o połowę niższy.

Funkcja odbijająca foton powinna ustalić nowy kierunek propagacji fotonu (promień wtórny) zgodnie z odbiciem lambertowskim, a więc w sposób losowy. Można posłużyć się w tym celu algorytmem losującym kierunek emisji fotonu ze źródła (opisanym w rozdziale 3.3.1) z poprawką dotyczącą ograniczenia do hemisfery losowanych kierunków w danym punkcie, aby nie przetransportować fotonu na drugą stronę geometrii.

W przeciwieństwie do rekursywnego śledzenia promieni, gdzie znalezienie przecięcia z powierzchnią dyfuzyjną (rozpraszającą) powodowało ostateczne obliczenie

koloru piksela, algorytm śledzenia fotonów zgodnie z mechanizmem rosyjskiej ruletki nie musi zakończyć ścieżki danego fotonu. W sytuacji, gdy powierzchnia zderzenia jest zwierciadlana lub załamująca, foton ulega dalszej propagacji zgodnie z prawem odbicia i prawem Snella (tak jak dla rekursywnego śledzenia promieni), aż do momentu trafienia w powierzchnię dyfuzyjną (rys. 3.20). Proces powtarzany jest aż do osiągnięcia określonej dopuszczalnej liczby odbić.



Rys. 3.20. Schemat przykładowych ścieżek fotonów wewnątrz Cornell Box ze sferą lustrzaną (po lewej) oraz refrakcyjną (po prawej): (a) dwa odbicia dyfuzyjne i absorpcja, (b) odbicie zwierciadlane a następnie dwa odbicia dyfuzyjne, (c) dwie refrakcje i absorpcja (ilustracja autora)

3.3.3. Zapis do mapy fotonowej

Informacja o fotonie zostaje zachowana wyłącznie wtedy, gdy trafi on w powierzchnię dyfuzyjną. Powierzchnie zwierciadlane i refrakcyjne jedynie modyfikują jego tor ruchu. Zapis informacji o zderzeniu fotonu z powierzchnią dyfuzyjną ma miejsce za każdym razem, nawet jeśli w wyniku rosyjskiej ruletki foton zostanie absorbowany. Oznacza to, że ten sam foton może być zapisany kilkakrotnie podczas swojego przebiegu w scenie.

Struktura fotonu

Podstawowa struktura danych służąca do przechowywania informacji o fotonie w momencie zderzenia, powinna koniecznie zawierać: pozycję, energię oraz wektor kierunkowy nadejścia fotonu. Pozycja fotonu jest znalezionym punktem przecięcia promienia po którym poruszał się foton, z powierzchnią dyfuzyjną. Energia fotonu jest reprezentowana przez trzy liczby zmiennoprzecinkowe (po jednej dla każdego kanału koloru: r, g, b). Dla oszczędności pamięci można skompresować zapis energii w postaci czterech bajtów używając formatu zaproponowanego przez Ward'a [War91].

Kierunek nadejścia fotonu jest znormalizowanym wektorem obliczonym na podstawie aktualnej i poprzedniej pozycji fotonu. Jest on potrzebny do dalszych obliczeń oświetlenia oraz do określenia na której stronie powierzchni znajduje się foton. Przez wzgląd na fakt, że wszystkie obliczenia wykonywane są we współrzędnych kartezjańskich najwygodniej jest zapisać wektor nadejścia fotonu jako trójelementową tablicę liczb zmiennoprzecinkowych. Jeśli istotnym ograniczeniem jest rozmiar przechowywanych informacji, można zastąpić współrzędne kartezjańskie współrzędnymi sferycznymi, do których zapisania wystarczą tylko dwa bajty (po jednym dla każdego kąta współrzędnych sferycznych) mapujące 65536 kierunków, niestety kosztem obliczeń ponieważ niezbędna jest konwersja pomiędzy współrzędnymi kartezjańskimi i sferycznymi.

Mapa fotonowa

Informacje o wszystkich fotonach, które zderzyły się z powierzchniami dyfuzyjnymi, są zgromadzone w postaci struktury danych zwanej mapą fotonową. Na tym etapie implementacji mapa fotonowa jest zwykłą jednowymiarową tablicą, której elementy przechowują strukturę fotonu. Inicjalizacja mapy fotonowej powinna mieć miejsce przed rozpoczęciem emisji fotonów ze źródeł światła.

W praktyce stosuje się zazwyczaj jednocześnie trzy oddzielne mapy fotonowe:

- 1) Globalna mapa fotonowa – zapisane w niej fotony stanowią aproksymowaną reprezentację globalnego oświetlenia sceny dla wszystkich powierzchni dyfuzyjnych. Fotony te oznaczone są w notacji ścieżek jako: $L\{S|D|V\}^*D$
- 2) Kaustyczna mapa fotonowa – zawiera jedynie fotony, które zostały na swej drodze chociaż raz załamane lub odbite zwierciadlanie nim uderzyły w powierzchnię dyfuzyjną. Fotony te oznaczone są w notacji ścieżek jako: $LS+D$.

3) Wolumetryczna mapa fotonowa – zawiera informacje o oświetleniu pośrednim ośrodka w którym rozchodzą się fotony (np. mgła). Fotony te oznaczone są w notacji ścieżek jako: $L\{S|D|V\}+V$.

Powyższe notacje ścieżek zawierają następujące oznaczenia:

L – źródło światła

S – odbicie zwierciadlane lub załamanie światła

D - zderzenie z powierzchnią dyfuzyjną

V - przejście przez ośrodek wolumetryczny

$\{a|b\}$ - wystąpienie a albo b

$*$ - od 0 do nieskończoności

$+$ - od 1 do nieskończoności

3.3.4. Rendering z zastosowaniem mapy fotonów

Po zakończeniu propagacji fotonów w scenie i utworzeniu mapy fotonów, następuje drugi etap, czyli rendering sceny na podstawie zebranych w mapie informacji. Mapa fotonów dla danej sceny jest niezależna od pozycji obserwatora (ang. view independent) i może być wykorzystana do wielokrotnego renderowania obrazu z różnych kamer. Istnieje co najmniej kilka sposobów przetworzenia danych zebranych w mapie fotonowej. Na przykład, fotony mogą posłużyć do obliczenia radiancji w wierzchołkach geometrii sceny [Mys97]. Poniżej przedstawiono metodę zaproponowaną przez Jensena [Jen96], która umożliwi rendering sceny za pomocą zmodyfikowanego algorytmu rekursywnego śledzenia promieni.

Z pozycji wirtualnej kamery wystrzeliwane są promienie pierwotne kolejno dla każdego piksela obrazu. W miejscach przecięć promieni z powierzchniami widocznymi o właściwościach dyfuzyjnych ustanawiane są punkty trafień (ang. hit points), dla których obliczana będzie radiancja. Promienie pierwotne trafiające w powierzchnie refrakcyjne lub zwierciadlane, generują rekurencyjnie promienie wtórne zgodnie z prawem Snella lub prawem odbicia (patrz rozdział 2.2). Śledzenie promieni wtórnych kończy się w momencie trafienia w powierzchnię dyfuzyjną lub gdy promienie wtórne nie trafią w żaden obiekt geometryczny sceny i wówczas pikselowi przypisywany jest kolor tła. Radiancja (L_i) dla danego punktu trafienia została rozdzielona na trzy składowe:

$$L_i = L_{iL} + L_{iD} + L_{iC} , \quad (3.10)$$

gdzie:

L_{iL} – radiancja pochodząca od źródła światła (oświetlenie bezpośrednie),

L_{iD} – radiancja odbita od powierzchni rozpraszających (oświetlenia pośrednie),

L_{ic} – radiancja uzyskana w wyniku interakcji fotonów z powierzchniami zwierciadlanymi i refrakcyjnymi (kaustyka).

Składowa oświetlenia bezpośredniego jest zazwyczaj najmocniejszym elementem oświetlenia w rozpatrywanym punkcie powierzchni, dlatego powinna zostać obliczona z możliwie dużą dokładnością, np. przy zastosowaniu algorytmu rekursywnego śledzenia promieni. Z rozpatrywanego punktu trafienia x należy wysłać promienie cienia w kierunku wszystkich źródeł światła, aby upewnić się, że nie są one przesłonięte przez inne obiekty sceny (patrz rozdział 3.1.1), a następnie obliczyć oświetlenie w tym punkcie za pomocą modelu Phong'a (patrz rozdział 2.6). Dla powierzchniowych źródeł światła konieczne jest wypuszczenie co najmniej kilku promieni cienia, w celu uzyskania nieostrych granic cieni.

Bardziej wydajna metoda obliczania cieni polega na emisji dodatkowych fotonów tzw. fotonów cieni [Jen95c], które po wykryciu pierwszego przecięcia z geometrią sceny są traktowane jak zwykłe fotony, a następnie propagowane w linii prostej i zapisywane z ujemną wartością energii na każdej napotkanej powierzchni dyfuzyjnej. Taki mechanizm prowadzi do znacznego przyspieszenia renderingu, szczególnie przy rozmytych krawędziach cieni. Jest to jednak rozwiązanie stochastyczne, zatem może wystąpić sytuacja, gdy przeoczone zostaną cienie pochodzące od małych obiektów, które nie zostały przecięte przez żadne fotony cieni. Problem ten dotyczy wszystkich metod wykonujących stochastyczne testy widoczności.

Wartość oświetlenia pośredniego w rozpatrywanym punkcie x może zostać obliczona na podstawie globalnej mapy fotonów jako suma energii znalezionych sąsiadujących fotonów (z uwzględnieniem funkcji BRDF [Jen95b]) podzielona przez powierzchnię koła o promieniu równym promieniowi sfery wyszukiwania sąsiadujących fotonów:

$$L(x, \omega_r) = \frac{1}{\Delta A} \sum_{i=1}^k f_r(x, \omega_i, \omega_r) E_i \quad (3.11)$$

gdzie:

L – radiancja światła odbitego od powierzchni w punkcie x w kierunku ω_r ,

E_i – energia fotonu i ,

f_r – funkcja BRDF,

ω_i – kierunek nadejścia fotonu i ,

ΔA – powierzchnia koła o promieniu wyszukiwania sąsiadujących fotonów,

k – liczba znalezionych sąsiadujących fotonów.

Funkcja BRDF w równaniu 3.11, oblicza iloczyn skalarny wektora nadejścia danego fotonu i wektora normalnego powierzchni w rozpatrywanym punkcie. Jeśli kąt między tymi wektorami jest większy od 90 stopni (tzn. iloczyn skalarny tych wektorów < 0) oznacza to, że foton znajduje się z drugiej strony rozpatrywanej powierzchni i nie powinien zostać dodany do sumy (czyli $BRDF=0$). Warunek ten może zostać pominięty dla przyspieszenia obliczeń jeśli w scenie nie znajdują się obiekty wklęsłe o grubości mniejszej niż maksymalny promień poszukiwań.

Przybliżona wartość radiancji wynikającej z kaustyki jest już zawarta w oświetleniu pośrednim wyznaczonym na podstawie globalnej mapy fotonowej. Oprócz usytuowania źródła światła względem obiektów generujących efekty kaustyczne, zasadniczy wpływ na wygląd kaustyki ma ilość oraz energia emitowanych fotonów. Im większa ich liczba, tym efekt będzie wyraźniejszy i zarazem bardziej ziarnisty.

Zaproponowane przez Jensena [Jen96] rozwiązanie polega na zastosowaniu dwóch map fotonów, umożliwiając w ten sposób niezależne obliczenia. Globalna mapa fotonów przechowuje wszystkie fotony rozpropagowane po całej scenie w celu obliczenia oświetlenia pośredniego, zaś oddzielna, kaustyczna mapa fotonów zawiera fotony wykorzystane wyłącznie do uzyskania efektów kaustycznych.

Warunkiem zapisu fotonu do mapy kaustycznej (w momencie zderzenia z powierzchnią dyfuzyjną) jest wcześniejsze, przynajmniej jednokrotne, przejście przez powierzchnię refrakcyjną lub odbicie od powierzchni zwierciadlanej. Aby ułatwić spełnienie powyższego warunku i przyspieszyć obliczenia można za pomocą mapy projekcji (patrz rozdział 3.3.1) wyemitować fotony ze źródła światła jedynie w stronę obiektów o właściwościach refrakcyjnych i zwierciadlanych. Należy pamiętać, że mapy projekcji pomagają uzyskać jedynie kaustykę spowodowaną oświetleniem bezpośrednim.

Aby uzyskać ostre krawędzie efektów kaustycznych, zakres wyszukiwania najbliższych fotonów w mapie kaustycznej powinien być stosunkowo niewielki. Przez wzgląd na duże zagęszczenie fotonów kaustycznych na małych obszarach należy również wprowadzić mechanizm zawężający promień wyszukiwania po przekroczeniu wymaganej liczby fotonów.

Obraz testowy wygenerowany za pomocą klasycznej metody strumieniowego mapowania fotonowego zaprezentowano na rysunku 3.21.



Rys. 3.21. Przykładowy obraz uzyskany za pomocą klasycznej metody mapowania fotonowego (ilustracja autora)

3.4. Podsumowanie

Celem wszystkich dotychczas zaprezentowanych metod globalnego oświetlenia było uzyskanie możliwie najszerszej gamy efektów wizualnych na renderowanych obrazach, przy jednoczesnym ograniczeniu szumu. Równolegle obserwujemy postęp prac mających na celu skrócenie czasu obliczeń konkretnych implementacji algorytmów globalnego oświetlenia za pomocą akceleracji sprzętowej z zastosowaniem GPU [Tom07] [Ant11]. Zagadnienie to nie jest jednakże przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej monografii.

Opisana metoda rekursywnego śledzenia promieni stanowi bazę wyjściową dla pozostałych przedstawionych algorytmów próbkowania punktowego. Algorytm rekursywnego śledzenia promienia jest również stosowany podczas drugiego etapu metody mapowania fotonowego. Rozproszone śledzenie promieni, stosuje stochastyczne próbkowanie, aby symulować efekty nieosiągalne za pomocą rekursywnego śledzenia promieni, takie jak miękkie cienie, rozmycie ruchu czy głębia ostrości. Śledzenie ścieżek rozszerza ten pomysł o stochastyczne próbkowanie możliwych ścieżek światła od kamery do źródła światła. Metoda śledzenia ścieżek jest jednak kosztowna obliczeniowo, ponieważ wymaga bardzo dużej liczby próbek w celu zniwelowania charakterystycznego dla tej metody szumu. Złożoność obliczeniowa tej metody wzrasta wraz z liczbą obiektów w scenie oraz rozdzielczością obrazu. Odmianą metody śledzenia ścieżek jest śledzenie dwukierunkowe sprawdzające się w przypadku scen z oświetleniem pośrednim oraz metoda Metropolis Light Transport mutująca utworzone uprzednio ścieżki dla uzyskania większej liczby próbek i tym samym redukcji szumu.

Równolegle rozwijana metoda energetyczna umożliwia poprawną symulację światła rozproszonego, jednakże nie pozwala uzyskać odbić zwierciadlanych oraz refrakcji. Główną wadą metody jest konieczność wcześniejszego dostosowywania sceny - podział na płaty i otaczanie geometrią scen otwartych. Metody hybrydowe, obliczające składową rozproszoną światła za pomocą metody energetycznej oraz odbicia zwierciadlane i rozbłyski za pomocą metody śledzenia promieni są niestety obciążone wadą metody energetycznej (koniecznością uprzedniego, czasochłonnego podziału sceny na płaty).

Przełomowym rozwiązaniem było wprowadzenie przez Henrika Jensena w 1996 roku metody mapowania fotonowego. Podobnie jak śledzenie ścieżek i Metropolis Light Transport, mapowanie fotonowe pozwala na uzyskanie efektów globalnego oświetlenia takich jak kaustyka, oświetlenie pośrednie, przenikanie kolorów, a także odbicia pod powierzchnią. Jednakże w odróżnieniu od wymienionych metod Monte Carlo, algorytm mapowania fotonowego jest bardziej uniwersalny i skutkuje zdecydowanie mniejszym szumem na wyrenderowanych obrazach. Główną zaletą mapowania fotonowego jest uniezależnienie obliczeń oświetlenia od reprezentacji geometrycznej sceny. Dzięki temu metoda pozwala na renderowanie scen składających się z milionów trójkątów i w przeciwieństwie do metody energetycznej nie wymaga jej podziałów na płaty. W konsekwencji większość obecnie używanych, komercyjnych silników renderujących korzysta właśnie z tej metody w celu fotorealistycznego renderingu obrazów.

4. Rozwój metody mapowania fotonowego

Praktyczne zastosowanie klasycznego algorytmu mapowania fotonowego [Jen96] wymaga wielokrotnego wyszukiwania sąsiadujących fotonów. Czas obliczeń rośnie wykładniczo wraz z rozmiarem mapy fotonowej, proporcjonalnie do liczby fotonów propagowanych w scenie oraz wielokrotności ich odbić.

Jakość obrazów uzyskiwanych za pomocą mapowania fotonowego zależy od precyzji z jaką wyznaczana jest gęstość energii fotonów w rozpatrywanym punkcie powierzchni. Przy zbyt małej liczbie emitowanych fotonów w stosunku do złożoności geometrycznej sceny możliwe są artefakty wynikające z odgórnego założenia współpłaszczyznowości wyszukiwanych fotonów (np. niewidoczność niewielkich obiektów sceny, wycieki światła).

Osobny problem stanowi rendering sekwencji obrazów animacji komputerowej z zastosowaniem algorytmu mapowania fotonowego, ponieważ dla uzyskania efektów kaustycznych poruszających się obiektów oraz rozmycia ruchu konieczne jest próbkowanie w czasie.

Niniejszy rozdział przedstawia aktualne kierunki badań mające na celu rozwiązanie powyższych problemów.

4.1. Wyszukiwanie sąsiadujących fotonów

Pierwszy etap algorytmu mapowania fotonowego generuje strukturę danych, zwaną mapą fotonową, która zawiera informacje o rozpropagowaniu fotonów w scenie. Silniki renderujące na ogół wprowadzają wewnętrzne rozróżnienie pomiędzy

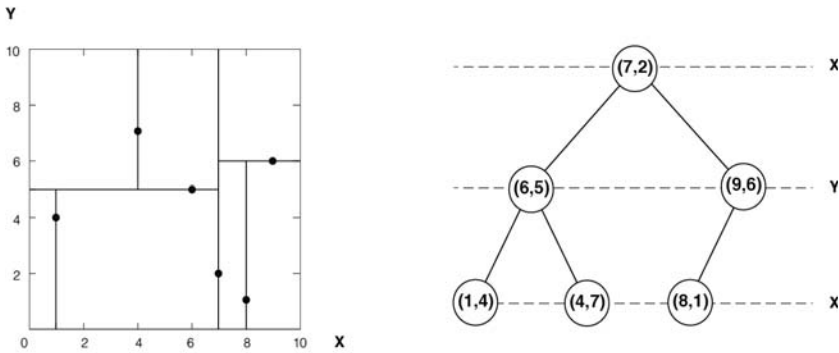
fotonami globalnego oświetlenia i fotonami użytymi wyłącznie do uzyskiwania efektów kaustycznych, umożliwiając w ten sposób niezależne obliczenie tych dwóch zjawisk. Takie rozwiązanie jest podyktowane faktem, że efekty kaustyczne cechują się ostrymi i wyraźnymi krawędziami, natomiast efekty globalnego oświetlenia w postaci przenikania kolorów powinny być możliwie miękkie i płynne. W związku z tym w obu wypadkach potrzebne są różne wartości promieni uśredniających. Oznacza to jednak konieczność wielokrotnego przeszukiwania dodatkowej mapy fotonów, generując tym samym dodatkowy czas obliczeń.

4.1.1. Reprezentacja mapy fotonów za pomocą drzew kd

Dla usprawnienia najbardziej czasochłonnej fazy algorytmu, czyli wyszukiwania sąsiadujących fotonów, zaproponowano reorganizację mapy fotonów, aby jej przeszukiwanie było możliwie najszybsze. Zastosowana struktura danych powinna również uwzględniać nierównomierny rozkład fotonów w scenie powstały w wyniku stochastycznych odbić od powierzchni rozpraszających. Z tego względu, zarówno jednorodny podział przestrzeni jak i zastosowanie drzew ósemkowych nie jest najlepszym rozwiązaniem [Bit99] [Hav02]. Strukturą danych spełniającą oba postawione wymagania jest zbalansowane drzewo kd [Ben75].

Drzewo kd (k -dimensional tree, z ang. drzewo k -wymiarowe) jest strukturą danych umożliwiającą podział przestrzeni o dowolnej liczbie wymiarów, w odróżnieniu od drzew czwórkowych i ósemkowych o odpowiednio 2 i 3 wymiarach. Drzewo kd jest szczególnym wariantem drzewa binarnego (ang. Binary Space Partition, BSP). W każdym węźle drzewa znajduje się k -wymiarowy punkt, wyznaczający płaszczyznę dzielącą przestrzeń na dwie podprzestrzenie. Punkty po lewej stronie płaszczyzny reprezentują lewe poddrzewo względem aktualnie rozpatrywanego węzła, a prawe punkty prawe poddrzewo. Przykładowo, jeżeli pierwszy podział nastąpił prostopadłe do osi X w punkcie $(7,2)$, to wszystkie punkty ze współrzędną $x < 7$ należą do lewego poddrzewa, zaś punkty $x > 7$ do prawego poddrzewa (rys. 4.1). Drugi poziom drzewa dzieli otrzymane dwie podprzestrzenie płaszczyznami prostopadłymi do osi Y , i tak dalej.

Warto zauważyć, że drzewa kd sprawują się najlepiej w przypadku przestrzeni o niewielkiej liczbie wymiarów. Dla wielowymiarowej przestrzeni, wyszukanie konkretnego elementu w drzewie wymaga odwiedzenia bardzo dużej liczby węzłów. W skrajnych okolicznościach, gdy liczba przechowywanych elementów jest tylko nieznacznie większa od liczby wymiarów przestrzeni, algorytm przeszukiwania drzewa jest tylko nieznacznie wydajniejszy od liniowego przeszukania wszystkich elementów. Jako regułę przyjmuje się, że zastosowanie drzewa kd dla reprezentacji zbioru n elementów jest opłacalne jeśli $n \gg 2^k$, gdzie k oznacza liczbę wymiarów przestrzeni [Ben75].



Rys. 4.1. Podział przestrzeni (po lewej) otrzymany na podstawie drzewa kd (po prawej) dla przykładowego zbioru sześciu punktów w przestrzeni dwuwymiarowej (ilustracja autora)

Wiedząc, że propagacja fotonów w scenie odbywa się w sposób stochastyczny, można założyć, że drzewo kd konstruowane dynamicznie, czyli równoległe ze śledzeniem kolejnych fotonów, będzie zbalansowane (tzn. poddrzewa na tych samych poziomach będą posiadały zbliżone liczby elementów). W praktyce, jeśli zastosujemy dodatkowo mapy projekcji dla określenia istotnych obszarów emisji fotonów (np. w celu uzyskania efektów kaustycznych), lub gdy scena zawiera duże powierzchnie lustrzane, równowaga dynamicznie tworzonego drzewa może być zaburzona. Dlatego najpewniejszym rozwiązaniem jest utworzenie statycznego drzewa kd po ukończeniu etapu śledzenia fotonów w scenie i przed przystąpieniem do renderingu, na podstawie znanej już tablicy mapy fotonowej.

Złożoność algorytmu generującego zbalansowane drzewo kd zawierające n fotonów wynosi $O(n \log^2 n)$ jeśli do obliczenia median używany był algorytm sortujący o złożoności $O(n \log n)$ [Sed92].

Balansowanie drzewa kd jest podobne do balansowania drzew binarnych. Różnica polega na sposobie wyboru płaszczyzny dzielącej. Po ustaleniu wymiaru podziału, następuje wybranie z listy punktów mediany dla rozpatrywanego wymiaru i ustanowienie jej korzeniem drzewa [Cor09]. Lewe i prawe poddrzewo korzenia powstaje przez rekurencyjne wywołanie funkcji dla dwóch rozłącznych list zawierających punkty o współrzędnej rozpatrywanego wymiaru większej od mediany i punkty o współrzędnej wymiaru mniejszej od mediany. Wybór wymiarów, względem których dokonywany jest podział na kolejnych poziomach drzewa, może odbywać się naprzemiennie (głębokość drzewa dzielona modulo przez liczbę wymiarów przestrzeni) lub w oparciu o aktualnie najdłuższy bok prostopadłościanu otaczającego wszystkie punkty.

Pseudokod 4.1 generujący zbalansowane drzewo kd na podstawie listy fotonów zapisanej w mapie fotonowej jest następujący:

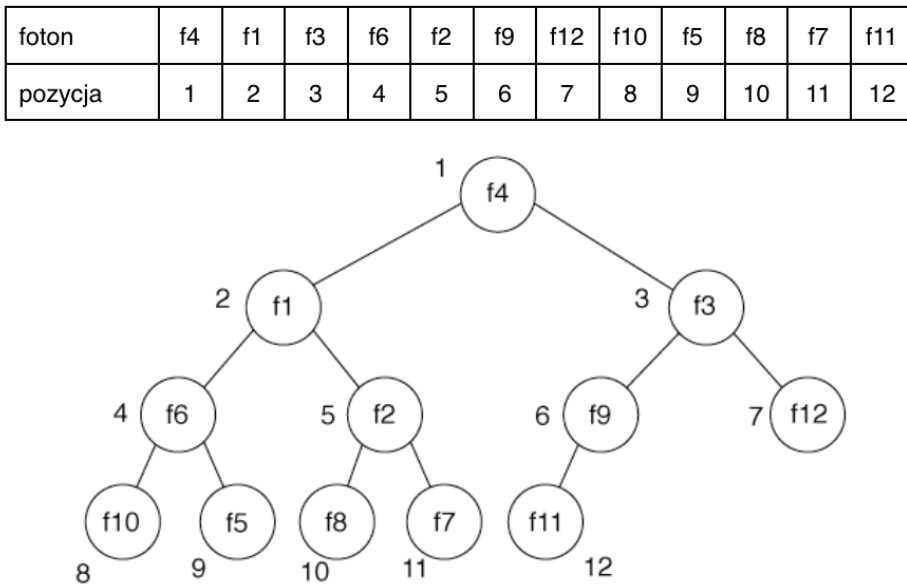
Pseudokod 4.1 Balansowanie drzewa kd

```
węzeł balansuj( lista_fotonów, głębokość )
{
    if ( lista_fotonów jest pusta ) // warunek stopu
    {
        return null;
    }
    // Wariant 1 wyznaczania wymiaru podziału -----
    wyznacz_prostopadłościan_otaczający_wszystkie_punkty();
    // najlepiej sprawdzać min i max współrzędnych
    // podczas zapisu fotonów do mapy
    int wymiar = oś_najdłuższego_wymiaru_prostopadłościanu();
    // Wariant 2 wyznaczania wymiaru podziału -----
    int wymiar = głębokość mod k;
    // k jest liczbą współrzędnych czyli 3
    foton mediana = znajdź_mediane_listy( lista_
    fotonów, wymiar );
    // mediana jest fotonem środkowym biorąc pod uwagę
    // tylko współrzędne z określonego wymiaru
    lista_lewa = wszystkie fotony o współrzędnych wymiaru <
    mediana;
    lista_prawa = wszystkie fotony o współrzędnych wymiaru >
    mediana;
    // w zależności od sposobu zapisu drzewa może to oznaczać
    // utworzenie nowego obiektu z referencją do fotonu
    // lub wstawienie fotonu we właściwe miejsce w tablicy
    utwórz_nowy_węzeł();
    // referencja do fotonu w tablicy
    węzeł.foton = mediana;
    // zapisz wymiar, który będzie użyty do przeszukiwania
    węzeł.foton.flaga = wymiar;
    // wskaźnik do lewego dziecka
    węzeł.lewy = balansuj( lista_lewa, głębokość + 1 );
    // wskaźnik do prawego dziecka
    węzeł.prawy = balansuj( lista_prawa, głębokość + 1 );
    return węzeł;
}
```

Reorganizacja mapy fotonów do postaci drzewa kd wymaga rozszerzenia definicji struktury fotonu o dodatkowe pole będące flagą używaną do konstrukcji drzewa kd, na podstawie której odbywać się będzie przeszukiwanie drzewa. Tworzone w powyższym algorytmie zbalansowane drzewo może być przechowywane w pamięci jako oddzielna struktura, której węzły zawierają jedynie referencje do stosownych fotonów w tablicy oraz do lewego i prawego dziecka.

Oszczędniejszym sposobem zapisu drzewa fotonów jest takie poukładanie fotonów w tablicy, aby utworzyć strukturę kopca (ang. heap) [Sed92], dzięki czemu nie będzie potrzeby oddzielnego przechowywania wskaźników do fotonów. Poruszanie w drzewie odbywa się wówczas na podstawie pozycji (indeks + 1) fotonu w tablicy. Korzeń drzewa powinien zostać umieszczony na pierwszej pozycji w tablicy, natomiast dzieci dowolnego i -tego elementu tablicy znajdują się na pozycji $2i$ (lewe) oraz $2i + 1$ (prawe). Rodzic dowolnego i -tego elementu może zostać zlokalizowany jako element $i/2$ (rys. 4.2).

Złożoność obliczeniowa operacji przeszukania mapy fotonowej, reprezentowanej w postaci n -elementowej tablicy, wynosi $O(n)$. W przypadku reprezentacji mapy za pomocą zbalansowanego drzewa kd koszt tej samej operacji wynosi tylko $O(\log n)$, gdzie n oznacza liczbę fotonów w drzewie. Algorytm wyszukujący zadaną liczbę najbliższych fotonów w drzewie kd jest prostym rozszerzeniem przeszukiwania drzewa binarnego [Cor09] [Sed92] [Hor93] opisanego przez Bentley'a [Ben75].



Rys. 4.2. Tablica 12 fotonów zorganizowanych w strukturę kopca (ilustracja autora)

Przeszukiwanie rozpoczyna się od elementu będącego korzeniem drzewa kd. Jeśli znajduje się on w odległości od punktu trafienia mniejszej niż początkowy maksymalny promień poszukiwań, zostanie dodany do listy znalezionych sąsiadujących fotonów. Następnie, w zależności od tego po której stronie płaszczyzny podziału przechodzącej przez rozpatrywany foton znajduje się punkt trafienia, funkcja zostanie wywołana rekurencyjnie kolejno dla lewego i prawego poddrzewa. Właściwe dobranie początkowego maksymalnego promienia poszukiwań względem rozmiarów sceny jest kluczowe dla wydajności algorytmu. Jeśli będzie on zbyt duży konieczne może okazać się przeszukiwanie większości węzłów i tym samym niewielki zysk czasowy. Z drugiej strony zbyt mały rozmiar promienia może spowodować nieodnalezienie zadanej liczby fotonów wokół próbkowanego punktu, a w rezultacie bardzo duży szum renderowanego obrazu. Warto zauważyć, że porównując odległości fotonów od próbkowanego punktu wystarczy obliczyć kwadraty różnic współrzędnych bez kosztownego obliczeniowo wyciągania pierwiastków.

Pseudokod 4.2 funkcji przeszukującej mapę fotonową w celu znalezienia zadanej liczby najbliższych fotonów jest następujący:

Pseudokod 4.2 Przeszukiwanie mapy fotonowej.

x – pozycja trafienia promienia próbkującego z kamery

d – początkowy maksymalny promień wyszukiwań

q – odległość od fotonu p do x

h – lista n znalezionych najbliższych fotonów

p – indeks fotonu

```
znajdź_fotony( p , x )
{
    // dopóki nie zeszliśmy na dno drzewa (koniec tablicy)
    if ( 2p+1 < liczba_fotonów )
    {
        // rozpatrz węzły dzieci
         $\delta$  = oblicz_dystans_od_x_do_płaszczyzny_podziału( p , x );
        // odejmowanie odpowiednich współrzędnych wymiaru
        // określonego przez flagę rozpatrywanego fotonu p
        if (  $\delta$  < 0 )
        { // jesteśmy na lewo od płaszczyzny więc najpierw
            // przeszukaj lewe poddrzewo
            znajdź_fotony( 2p );
            if (  $\delta^2$  <  $d^2$  )
            {
```

```
// jeśli promień poszukiwań (d) jest większy niż
// dystans od x do płaszczyzny podziału (δ)
// przeszukaj również prawe poddrzewo
znajdź_fotony( 2p + 1 );
}
else
{
    // jesteśmy na prawo od płaszczyzny więc najpierw
    // przeszukaj prawe poddrzewo
    znajdź_fotony( 2p + 1 );
    if(  $\delta^2 < d^2$  )
    {
        // jeśli promień poszukiwań (d) jest większy niż
        // dystans od x do płaszczyzny podziału (δ)
        // przeszukaj również lewe poddrzewo
        znajdź_fotony( 2p );
    }
}
q2 = kwadrat_odległości_od_fotonu_p_do_x();
if (  $q^2 < d^2$  ) // jeśli foton jest wystarczająco blisko
{
    dopisz_foton_do_listy_h();
    if (lista h jest już pełna)
    {
        wyrzuć_z_listy_najodleglejszy_foton();
        // zawęż maksymalny obszar poszukiwań do aktualnie
        // najdalszego fotonu na liście
        d2 = kwadrat_odległości_od_x_do_max_h();
    }
}
}
```

Wywołanie funkcji `znajdź_fotony()` z parametrem $p=1$ rozpoczyna przeszukiwanie drzewa od korzenia. Jeśli lista najbliższych fotonów (h) będzie przechowywana w postaci n -elementowej tablicy, wówczas funkcja `wyrzuć_z_listy_najodleglejszy_foton()` powinna przesortować dotychczasowe n elementów listy wraz z kolejnym ($n+1$) elementem, który spełnił warunek $q^2 < d^2$, gdzie d jest początkowym maksymalnym promieniem wyszukiwań, q jest odległością od fotonu p do rozpatrywanego punktu trafienia x . Następnie należy usunąć ostatni element, czyli ten który jest najodleglejszy od punktu próbkowania. Należy również w tym momencie zawęzić obszar poszukiwań przypisując do zmiennej d odległość

od x do aktualnie ostatniego (znajdującego się najdalej) elementu listy. W ten sposób pomijamy w późniejszych poszukiwaniach obszary drzewa, które z pewnością nie zawierają interesujących nas fotonów.

Operacja sortowania jest kosztowna pod względem czasu obliczeń, dlatego wydajnym rozwiązaniem jest organizacja tablicy najbliższych fotonów, w postaci wspomnianej wcześniej struktury kopca [Sed92]. Korzeniem takiego kopca powinien być foton najodleglejszy od punktu x spośród wszystkich aktualnie znalezionych fotonów spełniających warunek $q^2 < d^2$. Każde dziecko powinno znajdować się bliżej punktu x od swojego rodzica. Znalezienie kolejnego fotonu spełniającego warunek powoduje dodanie nowego wierzchołka do kopca według algorytmu 4.1.

Algorytm 4.1. Dodawanie nowego fotonu do struktury kopca.

1. *Wstaw wierzchołek (foton) na ostatnią pozycję (dno) kopca.*
2. *Zamieniaj się pozycjami z rodzicem (przepychaj w górę) tak długo, aż odległość rodzica od punktu x będzie większa niż odległość dodawanego fotonu, lub element dotrze na pozycję 1 czyli stanie się korzeniem.*

W ten sposób lista najbliższych fotonów jest zawsze posortowana i w razie przekroczenia liczby poszukiwanych fotonów, usunięcie nadmiarowego (najodleglejszego) znalezionej fotonu oznacza usunięcie samego korzenia ze szczytu kopca według algorytmu 4.2.

Algorytm 4.2 Usuwanie najodleglejszego fotonu ze struktury kopca.

1. *Usuń wierzchołek (foton) ze szczytu kopca.*
2. *Przestaw ostatni wierzchołek z pozycji $n+1$ na szczyt kopca.*
3. *Spychaj przestawiony wierzchołek w dół, zamieniając pozycjami z elementami do momentu gdy odległość rodzica od punktu x będzie większa niż odległość spychanego w dół fotonu lub gdy foton dotrze na spód kopca.*

Zarówno wstawianie jak i usuwanie obiektów ze szczytu kopca ma złożoność obliczeniową $O(\log n)$.

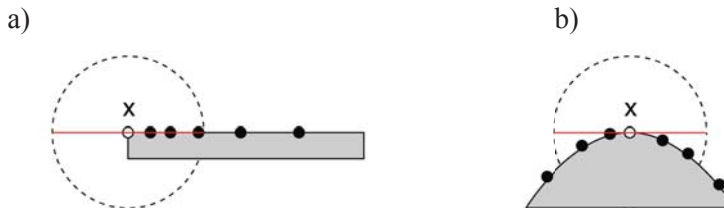
4.2. Wyznaczanie gęstości energii fotonów

W sytuacji, gdy geometria otoczenia próbkowanego punktu (x) nie jest płaska lub jest znacząco mniejsza od promienia sfery (rys. 4.3), wewnątrz której wyszukiwana jest zadana liczba fotonów, wówczas równanie (3.11) skutkuje pojawieniem się arte-

faktów w postaci obszarów niedoświetlonych (tzw. wycieków cieni) lub prześwietlonych (tzw. wycieki światła).

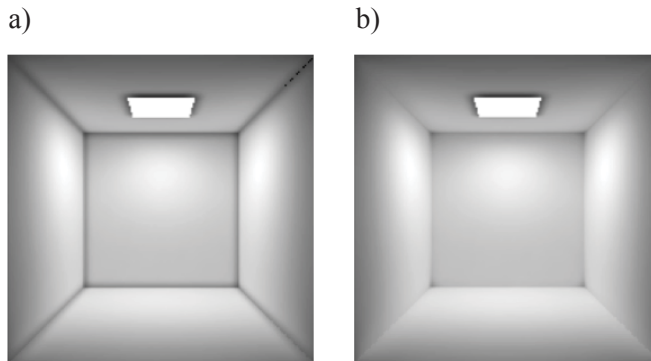
Błędy wynikające z niezerowej powierzchni uśredniającej (ang. proximity bias) prowadzą do utraty ostrości, szczególnie utraty kontrastów na krawędziach. Ten problem można zniwelować zwiększając liczbę fotonów lub za pomocą wprowadzenia funkcji estymacji gęstości jądra (np. Epanechnikov, Gauss) [Sil86], przypisując fotonom wagi, w zależności od odległości od punktu próbkującego (x).

Błędy powstające na krawędziach obiektów (ang. boundary bias) oraz na powierzchniach zakrzywionych (ang. topological bias) wynikają z założenia współpłaszczyznowości fotonów zebranych wokół rozpatrywanego punktu [Suy02].



Rys. 4.3. Schemat błędów powstających na skutek niedokładnego wyznaczenia gęstości energii fotonów blisko krawędzi obiektów (a) oraz na powierzchniach wypukłych (b) (ilustracja autora)

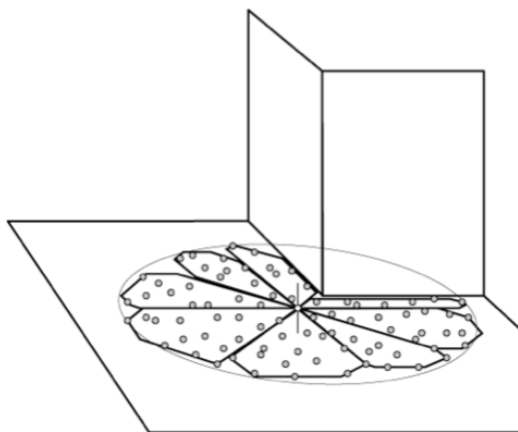
Algorytm zaproponowany w [Hey02], jest próbą zmniejszenia zaistniałych błędów na podstawie informacji o geometrii w sąsiedztwie punktu trafienia fotonu. Kolejnym krokiem mającym na celu zwiększenie precyzji wyznaczania gęstości energii fotonów i eliminację wycieków cieni było zastąpienie standardowo stosowanego pola powierzchni koła wokół rozpatrywanego punktu, adaptacyjnym przybliżeniem powierzchni zbierającej fotony za pomocą serii wielokątów w zależności od liczby próbek i geometrii sceny (rys. 4.4).



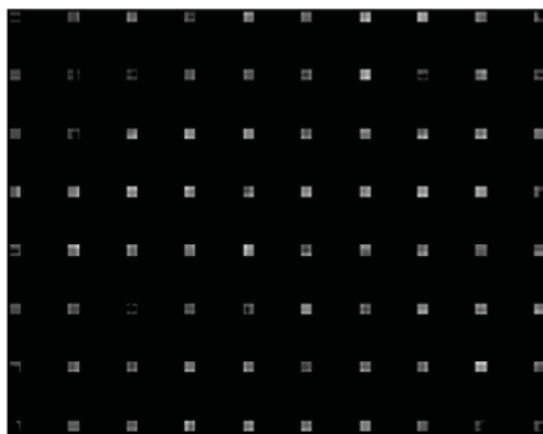
Rys. 4.4. Artefakty w postaci wycieków cieni na stykach krawędzi (a) oraz ich korekcja za pomocą adaptacyjnego przybliżenia powierzchni (b) [Las02]

Wyniki eksperymentu potwierdzają, że metoda adaptacyjna jest wydajniejsza niż inne wcześniej stosowane techniki zarówno pod względem zapotrzebowania na pamięć jak i czasu wykonania [Won05].

Heurystyczne podejście do tego samego tematu zaproponowali Tobler i Maierhofer [Tob06] niwelując wycieki cieni poprzez zastąpienie koła ośmiokątem lub ośmioma wielokątami w przypadku narożników ścian (rys. 4.5). Dzięki powyższym rozwiązaniom możliwe jest precyzyjne wyliczenie natężenia oświetlenia pośredniego blisko krawędzi obiektów oraz na relatywnie małych odizolowanych obiektach, unikając powstania artefaktów (rys. 4.6).

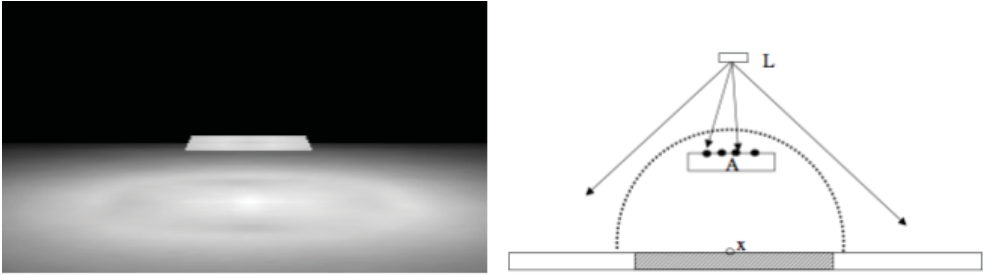


Rys. 4.5. Przybliżenie powierzchni zbierającej fotony za pomocą ośmiu ośmiokątów [Tob06]



Rys. 4.6. Błędne wyznaczenie natężenia oświetlenia pośredniego na relatywnie małych odizolowanych obiektach [Las02]

Specyficznym rodzajem artefaktów, charakterystycznym dla mapowania fotonowego jest rozświetlenie obszarów w bliskim sąsiedztwie powierzchni (rys. 4.7). Wynika to z uwzględnienia na etapie renderingu fotonów znajdujących się na powierzchniach sąsiadujących z rozpatrywanym punktem powierzchni, przy zbyt dużym promieniu wyszukiwań najbliższych fotonów.



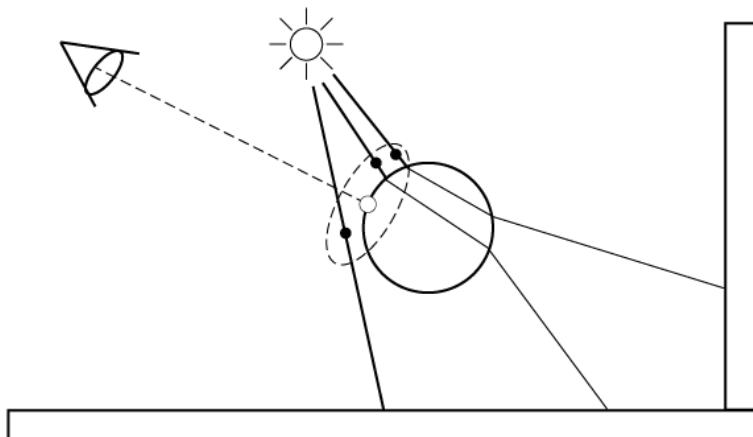
Rys. 4.7. Błędy rozświetlenia powstające w wyniku zebrania najbliższych fotonów należących do różnych geometrii [Las02]

4.2.1. Metoda mapowania promieni

Metodą bazującą na mapowaniu fotonowym jest mapowanie promieni (ang. ray mapping). Oszacowanie gęstości fotonów na płaszczyźnie stycznej do powierzchni w punkcie próbkowania odbywa się z uwzględnieniem wektora kierunku propagacji fotonu, zamiast samego punktu uderzenia fotonu [Las02]. Przykład mapy promieni - struktury danych służącej gromadzeniu informacji na temat transportu światła w scenie, zaproponował Havran [Hav05]. Przy takim podejściu założenie, że otoczenie punktu próbkującego musi być płaskie nie jest konieczne dla prawidłowego obliczenia gęstości energii fotonów, dlatego algorytm ten jest bardziej niezależny od geometrii sceny niż podstawowe mapowanie fotonowe.

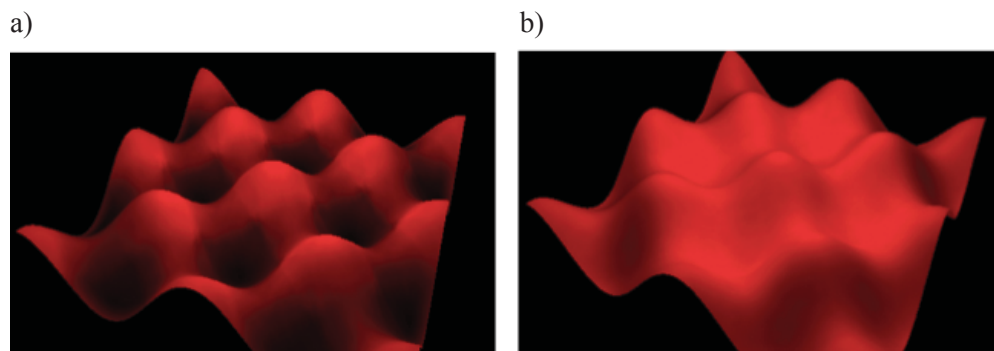
W przeciwieństwie do podstawowego mapowania fotonów, gdzie tylko pierwsze n znalezionych fotonów służy do wyznaczenia gęstości energii fotonów, przy mapowaniu promieni pod uwagę brane są wszystkie promienie przechodzące przez dysk o ustanowionym wymiarze (rys. 4.8).

Porównanie obu algorytmów wypada pod względem jakościowym zdecydowanie na korzyść mapowania promieni, szczególnie w przypadku złożonej geometrii sceny, jednakże potrzebuje on zdecydowanie większych zasobów (zarówno czasu obliczeń jak pamięci).

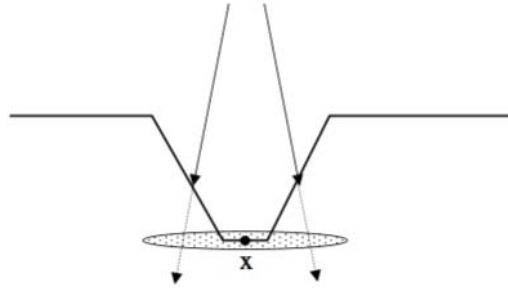


Rys. 4.8. Schemat mapowania promieni [Guz12a]

Charakterystycznym dla tej metody problemem jest wyznaczenie promieni przecinających dysk dla wklęsłych fragmentów siatki (rys. 4.9). Rozwiązaniem może być przechowywanie w strukturze promieni informacji zarówno o pierwszym jak i drugim znalezionym przecięciu promienia z geometrią. Dzięki temu możliwe jest sprawdzenie, czy przecięcie z powierzchnią dysku nastąpiło przed ewentualnym drugim przecięciem z geometrią obiektu. Jeśli tak, wówczas jest to obszar wklęsły i dla poprawnego odwzorowania gęstości energii fotonów należy również wziąć pod uwagę ten promień (rys. 4.10).



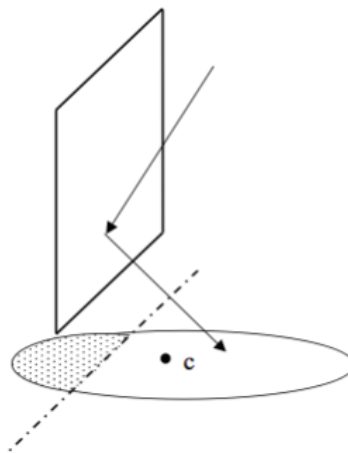
Rys. 4.9. Artefakty powstające podczas renderowania wklęsłych fragmentów siatki (a), oraz obraz skorygowany za pomocą sprawdzenia podwójnego przecięcia (b) [Las02]



Rys. 4.10. Wyznaczanie promieni dla wklęsłych fragmentów siatki [Las02]

Drugi problem to obliczenie gęstości promieni przechodzących przez powierzchnię dysku wokół punktu próbkowania znajdującego się na krawędzi, bądź na stykach płaszczyzn. W takich sytuacjach część obszaru dysku nie będzie zawierać żadnych przecięć, więc energia fotonów odpowiadających znalezionym promieniom będzie dzielona przez zbyt dużą wartość dając w rezultacie ciemniejsze obszary. Rozwiązaniem jest obcięcie powierzchni dysków za pomocą płaszczyzn wyznaczonych przez wektory prostopadłe do normalnych na krawędziach, co jest bardzo czasochłonne (rys. 4.11).

Niestety algorytm mapowania promieni wymaga wielokrotnego, czasochłonnego obliczania przecięcia promienia z dyskiem. Optymalizacje czasu za pomocą wyłonienia zbioru najbardziej prawdopodobnych promieni (zbieżność kierunków) oraz indeksowania przestrzennego dysków znajdujących się w otoczeniu punktu próbkowania zostały zaproponowane przez [Gar06].

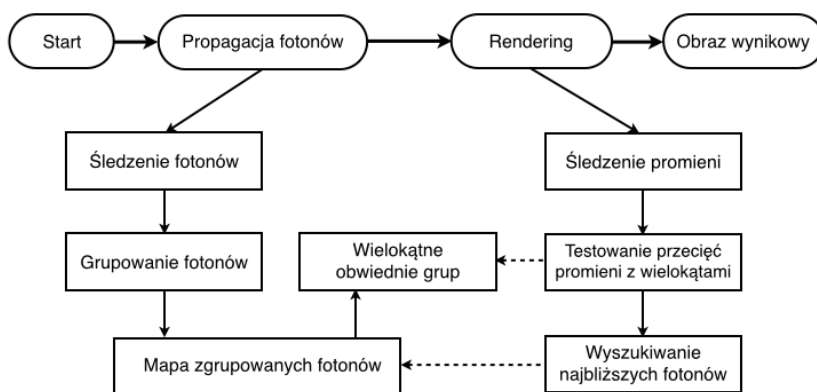


Rys. 4.11. Odcięcie obszaru dysku pozbawionego promieni [Las02]

4.2.2. Grupowe mapowanie fotonowe

Metoda grupowego mapowania fotonowego (ang. Grouped Photon Mapping) zakłada rozbudowanie pierwszego etapu metody Jensena o zestaw operacji mających na celu pogrupowanie fotonów zebranych w mapie fotonowej [Che10]. Grupowanie fotonów odbywa się na podstawie ich kierunków propagacji w scenie. Mapa fotonów w postaci drzewa kd przechowuje w tym przypadku grupy fotonów zamiast pojedynczych fotonów.

Utworzone grupy służą następnie do wyznaczenia wielokątnych powierzchni stosowanych podczas etapu renderingu w celu precyzyjnego obliczenia gęstości energii fotonów w rozpatrywanym punkcie powierzchni (x) zamiast standardowo przyjmowanego obszaru koła (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Schemat blokowy algorytmu grupowego mapowania fotonowego (ilustracja autora na podstawie [Che10])

W przypadku metody grupowego mapowania fotonowego testowanie przecięć promieni wychodzących z kamery ze sceną wymaga implementacji szybkiego algorytmu znajdowania przecięcia z dowolnym wielokątem. Dla optymalizacji obliczeń, grupy fotonów składające się z mniejszej niż ustalona liczba fotonów zostają łączone jeszcze na etapie konstrukcji mapy fotonowej.

4.3. Ograniczenie pojemności mapy fotonowej

Istotnym aspektem metody mapowania fotonowego jest rozmiar pamięci potrzebnej do przechowywania mapy fotonowej. Ograniczona pojemność mapy fotonowej wpływa w bezpośredni sposób na dokładność obliczanego rozkładu oświetlenia w scenie i tym samym na jakość renderowanych obrazów.

Podejście oparte na selektywnym zapisywaniu fotonów do mapy na podstawie przyjętego dla danego obszaru powierzchni kryterium gęstości fotonów przedstawili Suykens i Willems w roku 2000. Kryterium gęstości dla poszczególnych obszarów geometrii jest tworzone w wyniku dodatkowego przebiegu renderingu określającego widoczność powierzchni i lokalizację obiektów generujących kaustykę na podstawie algorytmu śledzenia promieni [Suy00]. W sytuacji gdy foton trafi w powierzchnię dla której kryterium gęstość fotonów zostało już spełnione jego energia jest rozdzielana pomiędzy najbliższymi fotonami [Suy00].

Równie istotną kwestią związaną z rozmiarem mapy fotonowej jest odpowiedź na pytanie ile fotonów należy wyemitować, aby uzyskać satysfakcjonujące rezultaty oświetlenia dla zadanej sceny. Poniżej przedstawione metody stanowią próbę rozwiązania problemu ograniczonej pojemności mapy fotonowej.

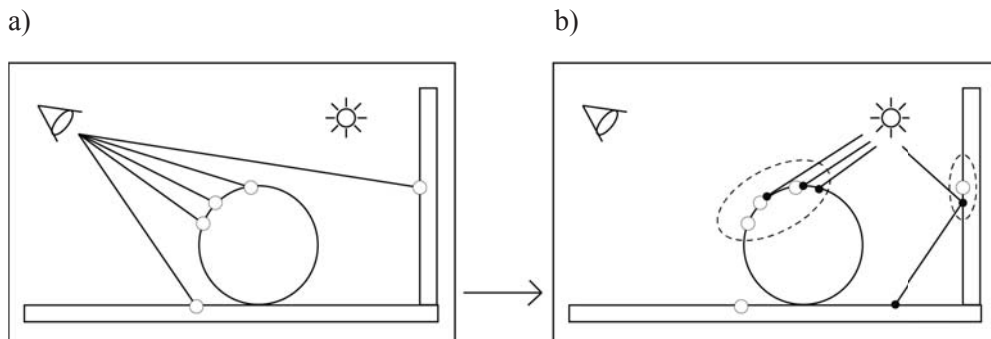
4.3.1. Importony

Zastosowanie map projekcji (rozdział 3.3.1) w celu określenia obszarów o istotnym znaczeniu dla jakości obrazu - takich jak miejsca nagromadzenia przedmiotów w scenie - usprawniło między innymi rendering zjawisk kaustycznych wymagający znacznego zagęszczenia fotonów w otoczeniu obiektów załamujących światło [Jen96]. Mapy projekcji nie mają jednak wpływu na fotony symulujące oświetlenie pośrednie, ponieważ mechanizm rosyjskiej ruletki prowadzi do losowego rozkładu fotonów, nie uwzględniającego widoczności powierzchni z pozycji kamery.

Wprowadzenie markerów ważności powierzchni (tzw. importonów) uwzględnianych podczas emisji i propagacji fotonów w scenie, pozwala na otrzymanie dokładniejszych rezultatów przy tej samej liczbie śledzonych fotonów [Pet98]. Zaproponowana przez Petera i Pietreka metoda polega na poprzedzeniu pierwszego etapu klasycznego mapowania fotonowego procesem propagacji importonów w scenie, które zostały wyemitowane z pozycji wirtualnej kamery (rys. 4.13). Importony trafiając w powierzchnię sceny zostają składowane w mapie importonów (ang. importance map), która zawiera wektor kierunku nadejścia importonu oraz współrzędne punktu trafienia. Utworzona w ten sposób mapa importonów jest następnie używana do określenia kierunków emisji fotonów ze źródła światła. W tym celu przeprowadzane jest próbkowanie sceny ze źródła światła w poszukiwaniu obszarów nagromadzenia importonów. Informacje o kierunkach odbić importonów są również brane pod uwagę podczas wyznaczania nowych kierunków fotonów odbitych w scenie. W celu usprawnienia przeszukiwania mapa importonów została podobnie jak mapa fotonów zorganizowana w postaci drzewa kd.

Takie rozwiązanie wymaga dodatkowego czasu obliczeń potrzebnego na konstrukcję mapy importonów oraz jej wielokrotne przeszukiwanie podczas pierwszego etapu algorytmu mapowania fotonowego. W zamian zapewnia lepszą z punktu

widzenia jakości obrazu dystrybucję fotonów w scenie, a tym samym pozwala na uzyskanie porównywalnych rezultatów przy mniejszej liczbie zapisanych fotonów do mapy niż bez użycia importonów. Zaletą tej metody jest również automatyczne generowanie mapy fotonów kaustycznych [Kel00].



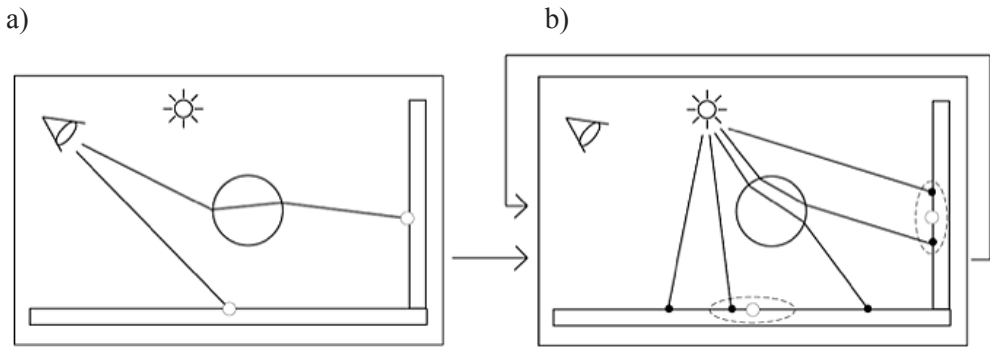
Rys. 4.13. Emisja importonów z pozycji wirtualnej kamery (a) poprzedzająca emisję fotonów ze źródła światła w kierunkach nagromadzenia importonów (b) (ilustracja autora)

4.3.2. Progresywne mapowanie fotonowe

Wprowadzenie koncepcji odwróconego mapowania fotonowego (ang. reverse photon mapping) [Sei05] zapoczątkowało prace nad progresywnym przybliżaniem gęstości energii fotonów w celu wyeliminowania drugiej, obok czasu wyznaczania najbliższych fotonów w sąsiedztwie, słabości algorytmu, czyli rosnącego zapotrzebowania na pamięć do przechowania zebranych informacji. Odwrócone mapowanie fotonowe polega na wyznaczeniu punktów, dla których obliczana będzie gęstość energii (E), jeszcze przed propagacją fotonów w scenie. W standardowej procedurze miało to miejsce dopiero podczas etapu renderingu. Odwrócenie kolejności działań spowodowało, że zamiast wyszukiwania dla każdego punktu trafienia zadanej liczby najbliższych fotonów, każdy foton zderzający się z powierzchnią rozpraszającą wyszukuje w ustalonym otoczeniu swojej ścieżki punkty trafienia dla których powinien zostać uwzględniony w obliczeniach gęstości energii (E). Takie podejście wymaga dla sprawnego przeszukiwania punktów trafienia odpowiedniej struktury. Kolejne wartości obliczonej gęstości energii (E) przechowywane są w tzw. mapie radiancji zawartej w plikach o rozdzielczości docelowo renderowanego obrazu [Her07].

Metoda progresywnego mapowania fotonowego zaproponowana przez Hachisukę [Hac08] bazuje na koncepcji odwróconego mapowania fotonowego. Pierwszy etap (ang. Ray Tracing Pass) to jednorazowe wyznaczenie punktów przecięcia promieni wychodzących z kamery z geometrią sceny. Punkty te przechowują następujące informacje: współrzędne punktu przecięcia, współrzędne piksela przez który

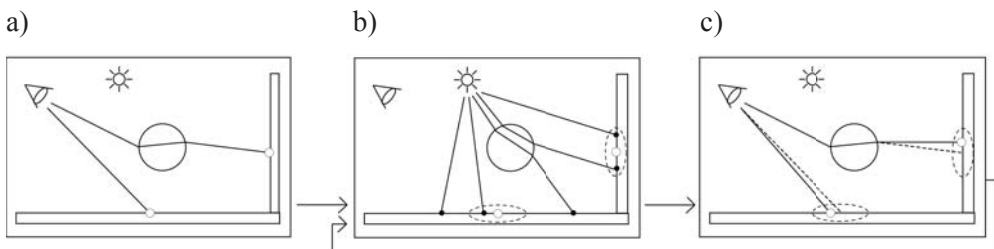
przechodził promień z kamery, wektor kierunkowy promienia, funkcję BRDF, promień obszaru wyszukiwania fotonów oraz wartość obliczonej energii. Drugi etap (ang. Photon Tracing Pass) polega na cyklicznym powtarzaniu propagacji fotonów w scenie po której następuje obliczenie przybliżonej wartości energii dla każdego z punktów trafienia i zawężenie promienia poszukiwań (rys. 4.14).



Rys. 4.14. Schemat dwóch etapów progresywnego mapowania fotonowego: a) przebieg śledzenia promieni, b) przebieg śledzenia fotonów [Guz12a]

4.3.3. Stochastyczne progresywne mapowanie fotonowe

Uzupełnienie progresywnego mapowania fotonowego o dodatkowy przebieg rozproszonego śledzenia promieni (opisanego w rozdziale 3.1.2) zapewnia uzyskanie takich efektów jak głębia ostrości (ang. depth of field) czy rozmycie ruchu (ang. motion blur) [Hac09]. Jedyną różnicą względem podstawowej wersji progresywnego mapowania fotonów polega na stochastycznej zmianie lokalizacji punktu trafienia w ustalonym otoczeniu dokonywanej po każdej propagacji fotonów (rys. 4.15).

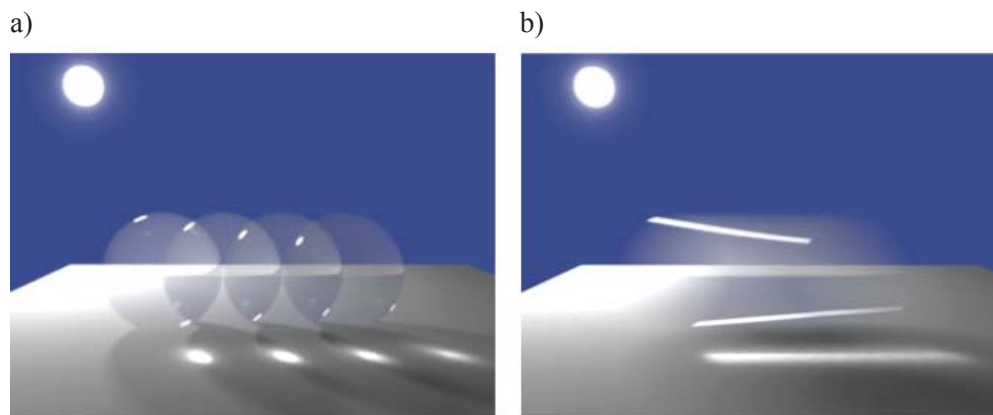


Rys. 4.15. Schemat trzech etapów algorytmu stochastycznego progresywnego mapowania fotonowego: a) wygenerowanie początkowych punktów trafienia dla poszczególnych pikseli, b) emisja i propagacja fotonów i uaktualnienie obliczonych wartości koloru pikseli na podstawie energii fotonów, które trafiły w otoczenie punktów, c) przebieg rozproszonego śledzenia promieni modyfikujący pozycję punktów trafienia w obrębie ustalonego otoczenia (ilustracja autora)

4.4. Mapowanie fotonów w czasie

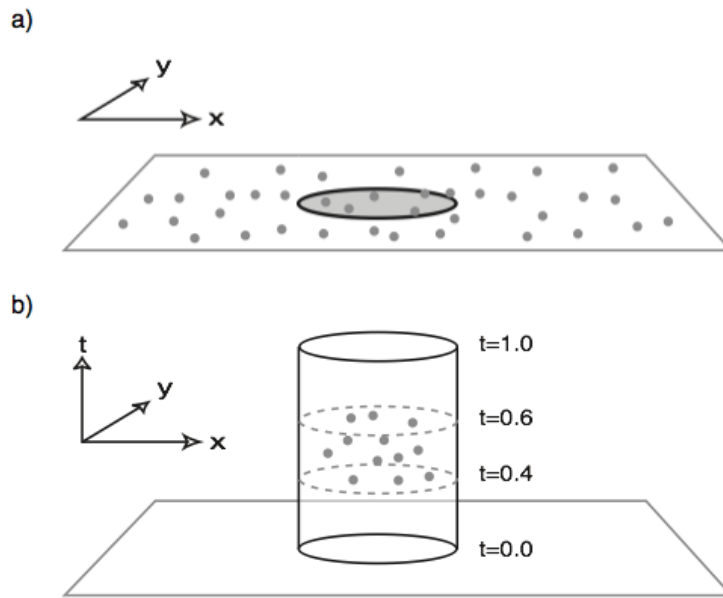
Technika mapowania fotonowego pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów, jednakże w swojej podstawowej formule nie uwzględnia zmian geometrii sceny w czasie (tzn. przemieszczania się obiektów) [Wal04]. W szczególności poprzednie implementacje (oprócz stochastycznego progresywnego mapowania fotonowego) nie rozważały problemu próbkowania w czasie, koniecznego do uzyskania efektów rozmycia ruchu.

Najprostsze rozwiązanie polegające na dystrybucji fotonów w kolejnych odstępach czasu przy użyciu standardowej mapy fotonów dla obiektów generujących efekty kaustyczne prowadzi do powstawania przekłamań (rys. 4.16).



Rys. 4.16. Nałożenie kolejnych klatek animacji przemieszczania się obiektu refrakcyjnego uzyskanych za pomocą mapowania fotonowego z widocznym efektem kaustycznym (a), oraz połączona sekwencja klatek (b) [Cam02]

Aby umożliwić przeszukiwanie fotonów zarówno w przestrzeni jak i w czasie wprowadzono do mapy fotonów informacje o czasie zderzenia każdego fotonu z powierzchnią [Cam02]. Cammarano i Jensen prezentują również dwie strategie lokalizacji fotonów. Pierwsza opiera się na dwuprzebiegowym przeszukiwaniu mapy fotonów, kolejno w przestrzeni i w czasie (rys. 4.17), druga natomiast stosuje czterowymiarowe drzewa kd przechowujące oprócz współrzędnych fotonów także czas ich zderzenia z geometrią sceny.



Rys. 4.17. Wyszukiwanie fotonów w przestrzeni w przypadku statycznej sceny (a) oraz w wybranym przedziale czasu (b) [Cam02]

5. Metoda strumieniowego mapowania fotonowego

Analiza aktualnych kierunków badań nad metodami mapowania fotonowego, przedstawiona w rozdziale 4, zaowocowała koncepcją autorskiej metody strumieniowego mapowania fotonowego. Podstawowa różnica względem klasycznego mapowania fotonowego zachodzi na etapie emisji i propagacji fotonów w scenie.

Rozwijane współcześnie metody mapowania fotonowego bazują na niezależnej propagacji pojedynczych fotonów. Metoda proponowana przez autora opiera się na innym podejściu - polegającym na zastosowaniu strumienia fotonów. Powiązanie fotonów w strumieniu ma na celu usprawnienie algorytmu propagacji fotonów oraz zmniejszenie szumu na renderowanych obrazach w wyniku uśredniania wartości energii ze wszystkich fotonów znalezionych strumieni.

Metoda w założeniach umożliwia obliczenie globalnego oświetlenia podczas syntezy obrazów wysokiej jakości zawierających efekty kaustyczne, przenikanie kolorów powierzchni sąsiadujących oraz miękkie cienie.

5.1. Definicja strumienia fotonów

Strumień fotonów jest zdefiniowany przez foton - zwany dalej fotonem wiodącym, wyznaczający kierunek propagacji strumienia w scenie, oraz przypisaną liczbę fotonów stowarzyszonych (n_{fd}), których kierunki propagacji są odchyłone od kierunku fotonu wiodącego w obszarze wyznaczonym przez promień szerokości strumienia (r_s). Liczba strumieni fotonów (n_{fs}), liczba fotonów stowarzyszonych w strumieniach

(n_{fa}) oraz promień szerokości strumieni (r_s) są parametrami zdefiniowanymi przez użytkownika. Początkowa energia pojedynczego strumienia jest wyznaczana na podstawie energii źródła światła, które emituje strumienie i liczby emitowanych strumieni, zgodnie z równaniem 5.1.

$$E_s = \frac{E_z}{n_{fs}}, \quad (5.1)$$

gdzie:

E_s – energia pojedynczego strumienia fotonów,

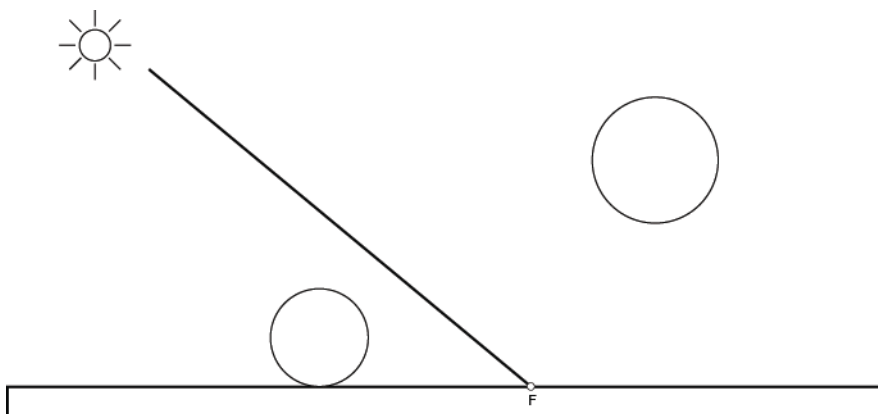
E_z – energia źródła światła, które emituje strumienie fotonów,

n_{fs} – liczba strumieni fotonów, emitowanych przez dane źródło światła.

Energia strumienia jest następnie równomiernie dzielona pomiędzy wszystkie fotony w strumieniu ($n_{fa}+1$). Liczba fotonów stowarzyszonych w poszczególnych strumieniach, a tym samym energia strumieni fotonów, może ulec zmniejszeniu podczas propagacji strumieni w scenie w wyniku mechanizmu tłumienia strumieni przedstawionego w rozdziale 5.4.

5.2. Emisja strumienia fotonów ze źródła światła

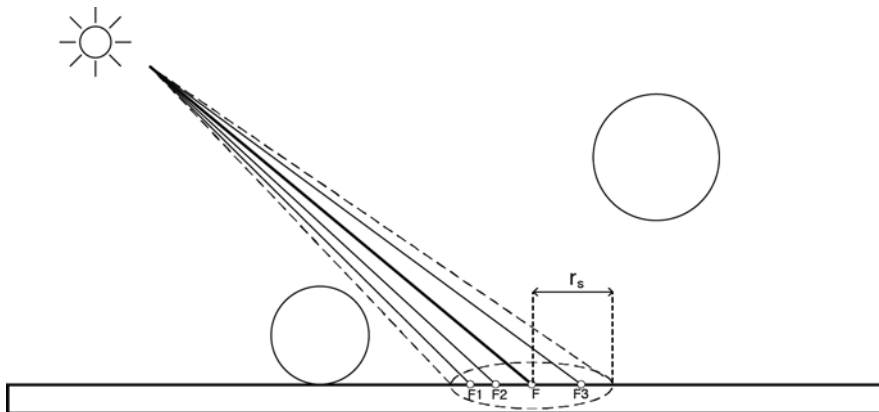
Pierwszy etap algorytmu strumieniowego mapowania fotonowego polega na emisji ze źródła światła ustalonej liczby fotonów wiodących (rys. 5.1) równej liczbie strumieni fotonów (n_{fs}). Kierunek emisji każdego fotonu wiodącego i tym samym kierunek strumienia może być wyznaczany w sposób stochastyczny lub przez zastosowanie map projekcji [Jen96] z uwzględnieniem typu źródła światła (punktowe, powierzchniowe, kierunkowe, reflektorowe).



Rys. 5.1. Emisja jednego fotonu wiodącego (F) ze źródła światła [Guz11a]

Kierunki poszczególnych fotonów stowarzyszonych w strumieniu wyznaczone są dopiero po znalezieniu punktu zderzenia fotonu wiodącego z geometrią sceny o materiale dyfuzyjnym, na podstawie losowo wybranych punktów w sferycznej przestrzeni o promieniu szerokości strumienia (r_s), wokół znalezionego punktu zderzenia (rys. 5.2).

Jeśli foton wiodący po wyemitowaniu ze źródła światła trafia w powierzchnię refrakcyjną lub zwierciadlaną, fotony stowarzyszone dla tego strumienia nie są emitowane ze źródła, a ich potencjalna energia jest przekazywana fotonowi wiodącemu.



Rys. 5.2. Emisja strumienia fotonów o promieniu (r_s), wyznaczonego przez foton wiodący (F) wraz z fotonami stowarzyszonymi ($F1, F2, F3$) [Guz11a]

5.3. Propagacja strumienia fotonów w scenie

Po wyznaczeniu pierwszego zderzenia strumienia fotonów z geometrią sceny następuje jego dalsza propagacja zgodnie z algorytmem 5.1.

Algorytm 5.1. Propagacja strumienia fotonów.

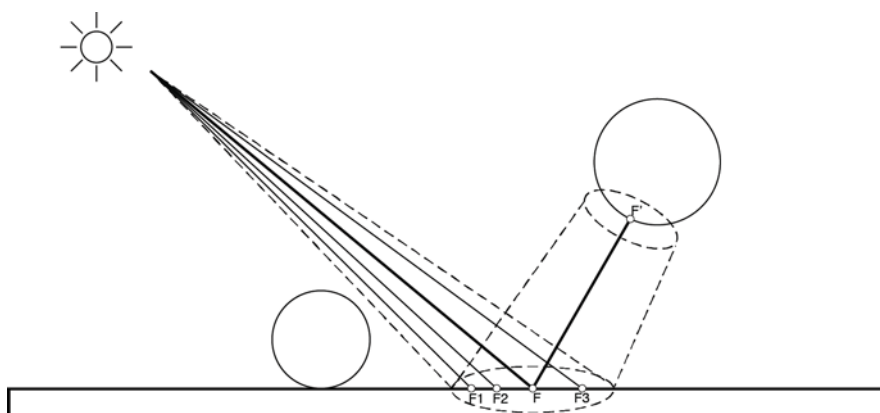
1. *Wyznaczanie nowego kierunku fotonu wiodącego:*

a) gdy foton trafił w powierzchnię dyfuzyjną następuje odbicie fotonu wiodącego w kierunku wyznaczonym stochastycznie w obrębie hemisfery wokół punktu trafienia.

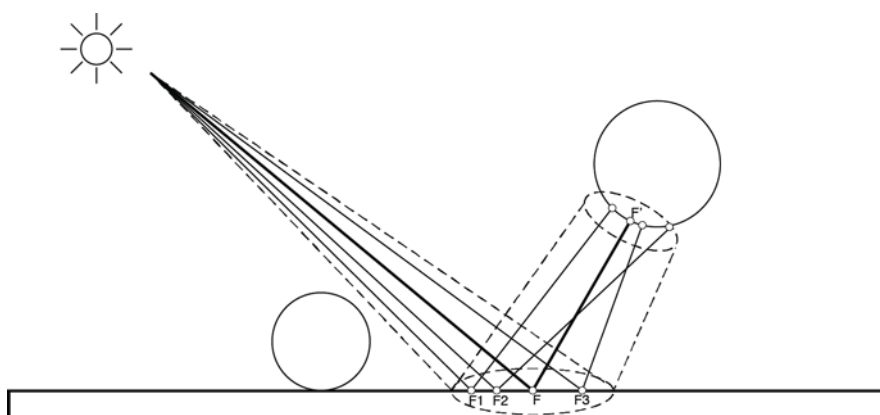
b) gdy foton trafił w powierzchnię zwierciadlaną następuje odbicie fotonu wiodącego zgodnie z prawem odbicia.

- c) gdy foton trafił w powierzchnię refrakcyjną następuje załamanie kierunku propagacji fotonu wiodącego zgodnie z prawem Snella.*
2. *Testowanie przecięć promienia wyznaczonego przez wektor kierunkowy fotonu wiodącego z geometrią sceny:*
- a) jeśli nie znaleziono przecięcia, następuje koniec propagacji strumienia w scenie.*
- b) jeśli znaleziono przecięcie, następuje przejście do punktu 3 algorytmu.*
3. *Sprawdzenie rodzaju materiału przypisanego do geometrii w znalezionym punkcie przecięcia fotonu wiodącego (punkt F' na rysunku 5.3):*
- a) w przypadku powierzchni dyfuzyjnych, dla każdego fotonu stowarzyszonego w strumieniu wyznaczany jest losowy punkt, w obszarze sfery o promieniu równym promieniowi szerokości strumienia, utworzonej wokół nowej pozycji fotonu wiodącego (F'). Punkt ten jest używany do wyznaczania nowego kierunku propagacji fotonu stowarzyszonego (rys. 5.4), dla którego realizowany jest mechanizm tłumienia (patrz rozdział 5.4). Po propagacji wszystkich fotonów stowarzyszonych w strumieniu, następuje sprawdzenie czy osiągnięto maksymalną dopuszczalną liczbę odbić (m_r) fotonu wiodącego od powierzchni dyfuzyjnej:*
- jeśli tak - następuje koniec propagacji strumienia w scenie;*
- jeśli nie - następuje przejście do punktu 1 algorytmu.*
- b) w przypadku powierzchni zwierciadlanej lub refrakcyjnej, wszystkie fotony stowarzyszone strumienia są eliminowane, zaś ich sumaryczna energia jest przypisywana do fotonu wiodącego i następuje przejście do punktu 1 algorytmu.*

Powyższy algorytm propagacji strumieni fotonów powoduje koncentrację energii strumieni fotonów w wyniku odbić zwierciadlanych i załamania światła, a w rezultacie uwydatnia efekty kaustyczne. Maksymalna dopuszczalna liczba odbić (m_r) fotonu wiodącego od powierzchni dyfuzyjnej jest parametrem zdefiniowanym przez użytkownika.



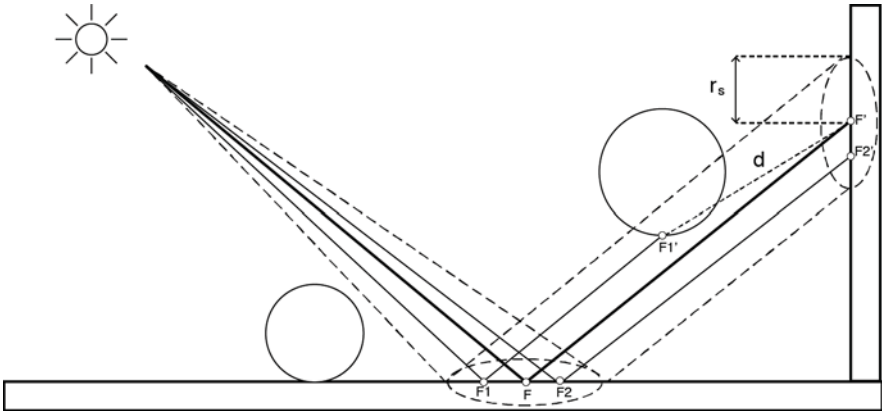
Rys. 5.3. Nowy punkt przecięcia (F') fotonu wiodącego z geometrią sceny po odbiciu od powierzchni dyfuzyjnej [Guz11a]



Rys. 5.4. Nowe kierunki propagacji fotonów stowarzyszonych w strumieniu po odbiciu od powierzchni dyfuzyjnej [Guz11a]

5.4. Tłumienie strumienia fotonów

Fotony stowarzyszone strumienia ($F1'$), dla których wyznaczone kierunki propagacji kolidują z geometrią sceny w odległości (d) większej od zdefiniowanego promienia szerokości strumienia (r_s) wokół nowej pozycji fotonu wiodącego (F'), są eliminowane ze strumienia, co odpowiada procesowi tłumienia strumienia (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Tłumienie fotonu (F_I') należącego do strumienia wyznaczonego przez foton wiodący (F') [Guz11a]

Możliwe jest również rozszerzenie definicji strumienia o dodatkowy parametr p będący współczynnikiem prawdopodobieństwa dalszej propagacji fotonu. W ten sposób, niezależnie od wykrytych kolizji fotonów z geometrią sceny, można wprowadzić cykliczne tłumienie strumienia za pomocą mechanizmu rosyjskiej ruletki (ang. Russian Roulette) [Gla95] :

$$\begin{aligned}\varepsilon < p &\Rightarrow \text{propagacja fotonu} \\ \varepsilon \geq p &\Rightarrow \text{eliminacja fotonu}\end{aligned}$$

gdzie:

ε – losowa wartość z przedziału $[0,1]$,

p – współczynnik prawdopodobieństwa dalszej propagacji fotonu, z przedziału $[0, 1]$.

5.5. Zapis do mapy strumieni fotonów

Każde zderzenie fotonu wiodącego z powierzchnią dyfuzyjną jest zapisywane w strukturze danych zwanej mapą strumieni fotonów. Mapa strumieni fotonów, w odróżnieniu od mapy fotonowej stosowanej w metodzie klasycznej, powinna przechowywać dane o strumieniach fotonów.

Propozycję odpowiednich struktur danych przechowywanych w mapie strumieni fotonów zaprezentowano w postaci pseudokodu 5.1. Pojedynczy foton (zarówno wiodący jak i stowarzyszony) jest opisany tak samo jak w klasycznej metodzie mapowania fotonowego, za pomocą pozycji zderzenia fotonu z geometrią sceny, energii fotonu zapisanej dla każdego kanału koloru r,g,b, oraz znormalizowanego wektora kierunku nadejścia fotonu.

Strumień fotonów przechowuje dane fotonu wiodącego strumienia oraz tablicę fotonów stowarzyszonych w strumieniu. Ponieważ mapa strumieni fotonów jest zorganizowana w postaci drzewa kd, konieczne jest przechowywanie w strukturze strumienia fotonów dodatkowej zmiennej flaga umożliwiającej konstrukcję i przeszukiwanie drzewa kd (patrz rozdział 4.1.1).

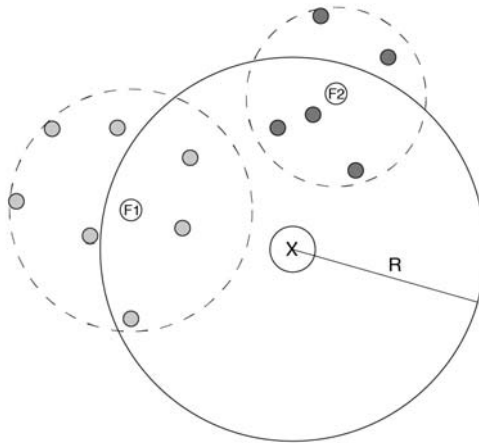
Pseudokod 5.1. Struktura fotonu oraz struktura strumienia fotonów.

```
struct foton
{
    //współrzędne punktu zderzenia fotonu z geometrią
    pozycja[3];
    //energia dla każdego kanału R,G,B
    energia[3];
    //kierunek nadejścia fotonu
    kierunek[3];
}

struct strumień_fotonów
{
    //foton wyznaczający kierunek propagacji strumienia
    foton wiodący;
    //tablica fotonów stowarzyszonych
    foton stowarzyszone[nfa];
    //flaga organizacji mapy strumieni fotonów w drzewo kd
    flaga;
}
```

5.6. Rendering z zastosowaniem mapy strumieni

Rendering realizowany jest analogicznie jak w klasycznym mapowaniu fotonowym za pomocą zmodyfikowanej metody rekursywnego śledzenia promieni. Podczas etapu renderingu, szukanie sąsiednich fotonów ogranicza się do znalezienia wiodących fotonów, z których każdy posiada własną tablicę fotonów stowarzyszonych tworzących dany strumień (rys. 5.6). W ten sposób liczba porównań niezbędnych do wykonania w procesie wyszukiwania fotonów jest mniejsza w stosunku do całkowitej liczby fotonów niż w klasycznej metodzie mapowania fotonowego.



Rys. 5.6. Strumienie wyznaczone przez fotony wiodące (F1) i (F2), znalezione wokół punktu trafienia (x) w promieniu wyszukiwania (R) [Guz11a]

Energia danego strumienia fotonów jest sumą energii wszystkich fotonów wchodzących w jego skład. Radiancja dla danego punktu trafienia x obliczana jest na podstawie sumy energii znalezionych sąsiadujących strumieni zgodnie z równaniem:

$$L(x, \omega_r) = \frac{1}{\Delta A} \sum_{i=1}^k f_r(x, \omega_i, \omega_r) E_i \quad (5.2)$$

gdzie:

L – radiancja światła odbitego od powierzchni w punkcie x w kierunku ω_r ,

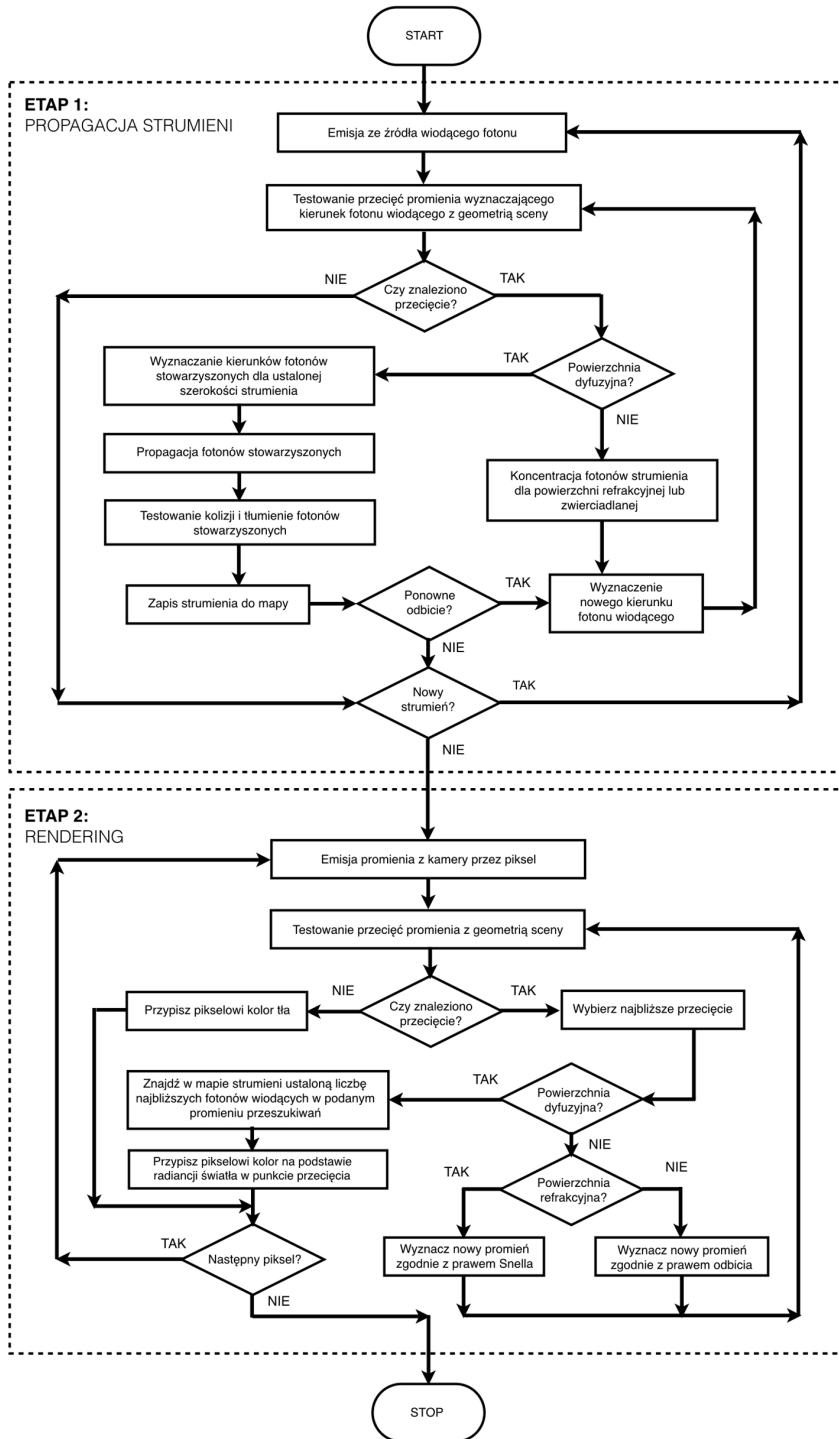
E_i – energia strumienia i ,

f_r – funkcja BRDF, tak jak dla klasycznego mapowania fotonowego (rozdział 3.3.4),

ΔA – powierzchnia koła o promieniu równym promieniowi (R) sfery wyszukiwania najbliższych fotonów wiodących,

k – liczba znalezionych fotonów wiodących.

Powyższe rozwiązanie umożliwia, podobnie jak w przypadku klasycznej metody mapowania fotonowego, zastosowanie funkcji gęstości jądra (ang. kernel density function) przypisującej wagi znalezionym strumieniom w zależności od ich odległości od punktu x , w celu bardziej precyzyjnego oszacowania gęstości energii strumieni w rozpatrywanym punkcie x (na przykład: Gauss, Epanechnikov [Sil86]). Do obliczenia składowej oświetlenia bezpośredniego finalnego obrazu zastosowano model Phong'a opisany w rozdziale 2.6. Algorytm strumieniowego mapowania fotonowego przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Schemat blokowy algorytmu strumieniowego mapowania fotonowego (ilustracja autora)

5.7. Podsumowanie

Proponowana metoda strumieniowego mapowania fotonowego stanowi modyfikację klasycznej metody mapowania fotonowego. Porównanie poszczególnych etapów metody strumieniowego mapowania fotonowego względem klasycznego mapowania fotonowego zawiera tabela 5.1. Obraz testowy uzyskany metodą strumieniowego mapowania fotonowego przedstawiono na rysunku 5.8.

Tabela 5.1. Zestawienie etapów klasycznego mapowania fotonowego i strumieniowego mapowania fotonowego

	Klasyczne mapowanie fotonowe	Strumieniowe mapowanie fotonowe
emisja	pojedyncze fotony	strumień fotonów definiowane przez fotony wiodące
tłumienie	mechanizm rosyjskiej ruletki	eliminacja fotonów stowarzyszonych
rendering	wyszukiwanie najbliższych fotonów	wyszukiwanie najbliższych strumieni

Metoda strumieniowego mapowania fotonowego wykazuje szereg zalet:

- Usprawnienie algorytmu wyszukiwania najbliższych sąsiadów przez wcześniejsze powiązanie fotonów w strumieniu.
- Uwydatnienie zjawisk kaustycznych przez koncentrację strumieni w przypadku napotkania powierzchni zwierciadlanych lub refrakcyjnych.
- Uwydatnienie efektu przenikania kolorów, w wyniku uwzględniania wartości energii fotonów na powierzchniach sąsiadujących, w obszarze strumienia fotonów.
- Zgrupowanie fotonów w strumień już na początku procesu propagacji umożliwia odwzorowanie mechanizmu tłumienia zgodnego z rzeczywistym zachowaniem światła.
- Metoda strumieniowa nie wyklucza zastosowania algorytmu progresywnego mapowania fotonowego [Hac08] ograniczającego zapotrzebowanie na pamięć potrzebną do przechowywania mapy fotonów.

- Powyższe rozwiązanie umożliwia, podobnie jak w przypadku klasycznej metody mapowania fotonowego, zastosowanie funkcji gęstości jądra (ang. kernel density function) przypisującej wagi znalezionym strumieniom w zależności od ich odległości od punktu x , w celu bardziej precyzyjnego oszacowania gęstości energii strumieni w rozpatrywanym punkcie x (na przykład: Gauss, Epanechnikov [Sil86])



Rys. 5.8. Obraz wygenerowany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego, dla 10000 strumieni po 100 fotonów stowarzyszonych, bez dodatkowych fotonów kaustycznych, promień szerokości strumienia równy 5 (1/4 szerokości sceny), promień wyszukiwania fotonów w mapie fotonowej równy 3,5 liczba wyszukiwanych najbliższych sąsiadów 100, dopuszczalna liczba odbić strumienia równa 4. Światło powierzchniowe składające się z 49 światel punktowych

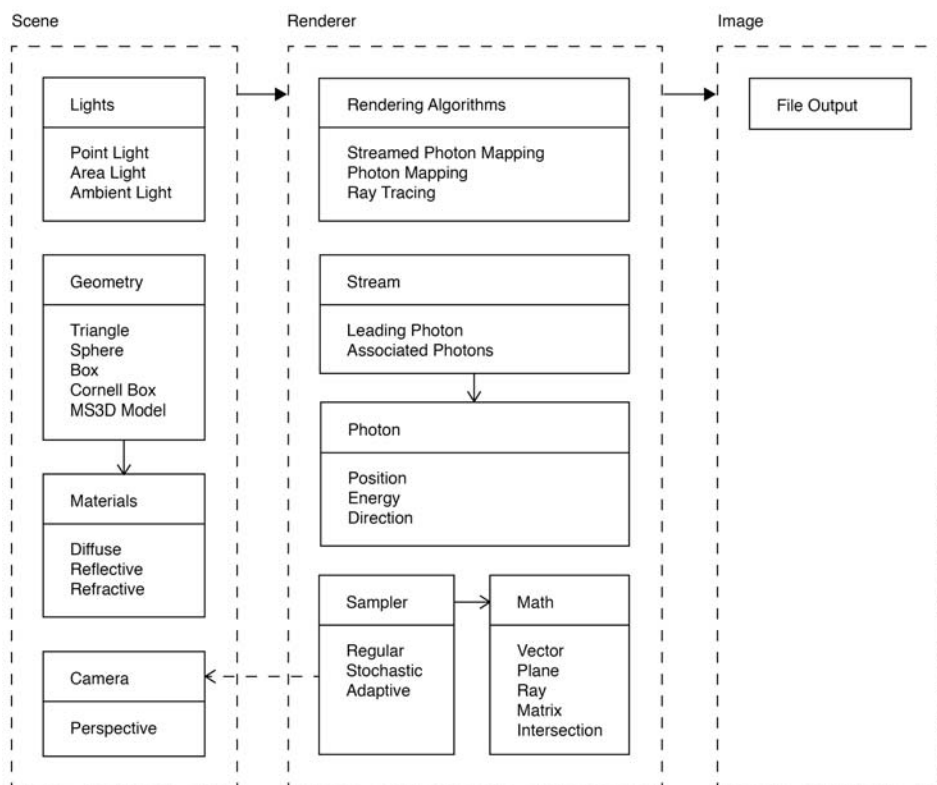
6. System renderujący

Prototyp systemu renderującego powstał w roku 2011 w ramach projektu badawczego Platforma informatyczna TEWI–Technologia Edukacja Wiedza Innowacja¹. Celem projektu było stworzenie środowiska umożliwiającego testowanie algorytmów fotorealistycznego renderingu [Guz12b]. Korzystając z projektu środowiska zaimplementowana została aplikacja renderująca udostępniająca klasyczną metodę mapowania fotonowego i metodę strumieniowego mapowania fotonowego. Aplikacja ta została użyta do wykonania testów opracowanej metody.

6.1. Architektura systemu

System renderujący został zaprojektowany tak, aby umożliwiał łatwą modyfikację i rozbudowę o nowe modele źródeł światła, materiały i algorytmy renderujące, na bazie zaimplementowanego opisu sceny i operacji matematycznych. Schemat systemu renderującego składającego się z trzech modułów: sceny, renderera i obrazu, przedstawiono na rysunku 6.1.

1 Platforma Informatyczna TEWI–projekt realizowany w latach 2010-2013 współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (POIG.02.03.00-00-028/09), który otrzymał dofinansowanie w ramach programu Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, przygotowany i realizowany w ramach konsorcjum pierwotnie utworzonego przez trzy Politechniki: Łódzką (lider, Instytut Informatyki, Centrum Komputerowe Politechniki Łódzkiej, Miejska sieć komputerowa LODMAN), Warszawską (Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa) oraz Białostocką (Wydział Informatyki).



Rys. 6.1. Schemat systemu renderującego umożliwiającego rendering metodą strumieniowego mapowania fotonowego (ilustracja autora)

Definicja wirtualnej sceny składa się z listy obiektów geometrycznych, listy zdefiniowanych źródeł światła oraz kamery. System w założeniach powinien umożliwiać utworzenie geometrii sceny za pomocą podstawowych prymitywów (trójkąt, sfera, sześcian) jak również modeli wyeksportowanych z programów do modelowania 3D w jednym z otwartych formatów plików grafiki trójwymiarowej. W tym celu została zaimplementowana funkcja wczytująca siatkę trójkątów wraz z wektorami normalnymi zapisaną w formacie MilkShape3D². Modele geometryczne mają przypisany jeden z trzech podstawowych typów materiałów: dyfuzyjny, refleksyjny lub refrakcyjny. W systemie zaimplementowano model punktowego źródła światła (ang. Point Light) na którym bazuje model światła powierzchniowego (ang. Area Light). Dodatkowo zaimplementowano światło otaczające (ang. Ambient Light).

Rendering sceny odbywa się za pomocą jednego z trzech algorytmów: śledzenia promieni, mapowania fotonowego lub strumieniowego mapowania fotonowego;

² MilkShape3D – format zapisu grafiki trójwymiarowej, <http://paulbourke.net/dataformats/ms3d/ms3d-spec.h>

w oparciu o zdefiniowaną kamerę perspektywiczną i wybrany mechanizm próbkowania. Na potrzeby wykonywanych obliczeń na wektorach, promieniach i macierzach został wydzielony moduł implementujący operacje matematyczne.

Efektem renderingu jest obraz sceny, który może zostać zapisany do zewnętrznego pliku w formacie PNG³.

6.2. Interfejs aplikacji renderującej

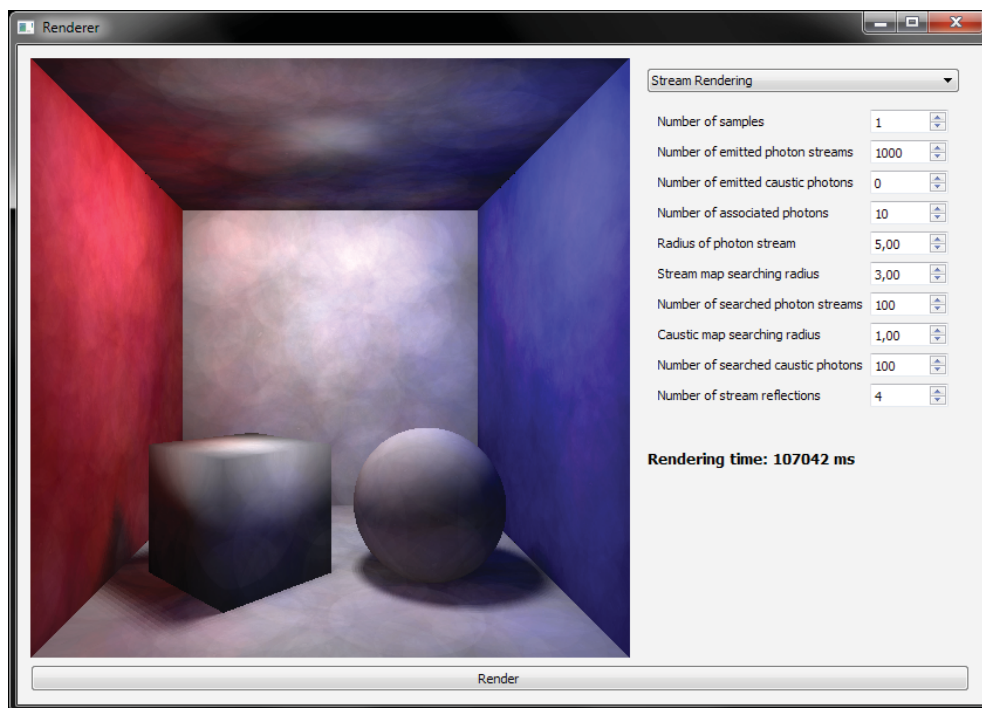
Na podstawie powyższej architektury systemu renderującego powstała aplikacja renderująca zaimplementowana w języku programowania C++ w środowisku Qt. Interfejs aplikacji renderującej został skonstruowany za pomocą modułu Qt Widgets⁴. Główne okno programu podzielono na dwie części. Po lewej stronie okna wyświetlany jest aktualnie renderowany obraz, po prawej stronie znajduje się panel pozwalający na wybór metody renderingu i odpowiadających jej parametrów (rys. 6.2).

Dla zaimplementowanej metody strumieniowego mapowania fotonowego wyszczególniono następujące parametry o wartościach podawanych za pośrednictwem interfejsu użytkownika aplikacji:

- *Number of samples* – liczba testowanych próbek dla piksela renderowanego obrazu.
- *Number of emitted photon streams* – liczba wyemitowanych strumieni fotonów.
- *Number of emitted caustic photons* – liczba wyemitowanych fotonów kaustycznych.
- *Number of associated photons* – liczba fotonów stowarzyszonych w strumieniu
- *Radius of photon stream* – promień strumienia fotonów.
- *Stream map searching radius* – promień wyszukiwania strumieni fotonów.
- *Number of searched photon streams* – liczba szukanych strumieni fotonów.
- *Caustic map searching radius* – promień wyszukiwania fotonów kaustycznych.
- *Number of searched caustic photons* – liczba szukanych fotonów kaustycznych.
- *Number of stream reflections* – dopuszczalna liczba odbić strumieni fotonów.

3 PNG (ang. Portable Network Graphic) – rastrowy format zapisu plików graficznych z bezstratną kompresją danych.

4 Qt Widgets – moduł biblioteki Qt zawierający zestaw elementów interfejsu użytkownika, takich jak edytowalne pola tekstowe, przyciski, rozwijalne menu.



Rys. 6.2. Okno aplikacji renderującej

Po ukończeniu renderingu w polu Rendering time wyświetlany jest czas podany w milisekundach. Wyrenderowany obraz oprócz wyświetlenia w oknie aplikacji jest równocześnie zapisywany do pliku zewnętrznego w formacie PNG o nazwie złożonej z wartości aktualnie ustawionych parametrów metody renderingu oraz czasu renderingu. Przykładowo plik wynikowy o nazwie `spm_1_1000_0_10_5_107042.png` oznacza, że obraz został wyrenderowany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego (spm) dla pojedynczego promienia próbkującego, 1000 strumieni fotonów, 0 fotonów kaustycznych, 10 fotonów stowarzyszonych w strumieniu, promieniu strumienia równym 5 jednostek sceny, w czasie 107042 ms.

6.3. Implementacja metody strumieniowego mapowania fotonowego

Metoda strumieniowego mapowania fotonowego została zaimplementowana w prezentowanym systemie renderującym za pomocą trzech głównych funkcji: `RenderSceneStream`, `GeneratePhotonMap`, `TraceStream`.

Funkcja `RenderSceneStream` dla podanej sceny i parametrów renderingu wywołuje funkcję `GeneratePhotonMap`, a następnie renderuje scenę za pomocą algo-

rytmu rekursywnego śledzenia promieni obliczając kolor piksela na podstawie znalezionych najbliższych strumieni. Pseudokod 6.1 funkcji `RenderSceneStream` jest następujący:

Pseudokod 6.1. Rendering za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego

```
RenderSceneStream(scena, liczba_próbek, liczba_strumieni,
liczba_fotonow_kaustycznych, liczba_fotonow_stowarzyszonych,
promień_strumienia, liczba_odbić)
{
    utwórz_obraz();
    włącz_licznik_czasu();
    // wywołaj funkcję tworzącą mapę strumieni i emitującą
    // strumienie fotonów
    mapa_strumieni = GeneratePhotonMap(scena,
liczba_strumieni,  liczba_fotonow_stowarzyszonych,
promień_strumienia, liczba_odbić);
    if( liczba_fotonow_kaustycznych > 0)
    {
        // wywołaj funkcję tworzącą mapę kaustyczną i emitującą
        // fotony kaustyczne
        mapa_kaustyczna = GenerateCausticMap(scena,
liczba_strumieni,  liczba_fotonow_kaustycznych,
liczba_odbić);
    }
    wyświetl_czas_emisji_i_propagacji_fotonów();
    // oblicz kolor piksela za pomocą algorytmu rekursywnego
    // śledzenia promieni na podstawie znalezionych
    // najbliższych strumieni w zależności od aktualnej
    // metody próbkowania
    for ( wszystkie piksele obrazu )
    {
        if ( próbkowanie_regularne )
        {
            promień = utwórz_promień_przez_środek_piksela();
            kolor_piksela = śledź_promień(scena,
                                     promień_szukania,
                                     mapa_strumieni,
                                     mapa_kaustyczna);
        }
    }
}
```

```
else if ( próbkowanie_stochastyczne )
{
    for ( liczba_próbek )
    {
        promień = utwórz_losowy_promień_przez_piksel();
        kolor_piksela += śledź_promień(scena,
            promień_szukania,
            mapa_strumieni,
            mapa_kaustyczna);
    }
    kolor_piksela /= liczba_próbek;
}
}
wyświetl_czas_renderingu();
zapisz_obraz_do_pliku();
} // koniec funkcji
```

Funkcja `GeneratePhotonMap` generuje ze wszystkich źródeł światła strumienie fotonów i dla każdego wyemitowanego strumienia wywołuje funkcję `TraceStream` odpowiedzialną za propagację strumienia fotonów w scenie. Pseudokod 6.2 funkcji `GeneratePhotonMap` jest następujący:

Pseudokod 6.2. Generowanie mapy strumieni.

```
GeneratePhotonMap(scena, liczba_strumieni,
liczba_fotonow_stowarzyszonych, promień_strumienia, liczba_
odbić);
{
    liczba_strumieni /= liczba_światła_sceny;
    // dla każdego światła w scenie wyemituj taką samą liczbę
    // strumieni fotonów
    for ( każde_źródło_światła_sceny )
    {
        for ( liczba_strumieni )
        {
            utwórz_foton_wiodący();
            wylosuj_kierunek_fotonu_wiodącego();
            // będący początkowo pozycją wszystkich fotonów
            // stowarzyszonych w strumieniu
```

```
strumień = utwórz_strumień(
    liczba_fotonow_stowarzyszonych,
    promień_strumienia, energia_źródła_światła);
// propaguj strumień fotonów w scenie
TraceStream(strumień, kierunek, geometria_sceny,
    mapa_strumieni, liczba_odbić);
}
}
// przeskaluj energie wszystkich fotonów zapisanych
// w mapie strumieni przez ich liczbę
skaluj_energie_wszystkich_fotonow_w_strumieniach();
zbuduj_drzewo_kd_strumieni();
} // koniec funkcji
```

Funkcja `TraceStream` propaguje strumień fotonów w scenie uwzględniając rodzaj materiału obiektu w który trafiają fotony. Pseudokod 6.3 funkcji `TraceStream` jest następujący:

Pseudokod 6.3. Propagacja fotonu w scenie.

```
TraceStream(strumień, kierunek, geometria_sceny, mapa_
strumieni, liczba_odbić)
{
    trafienie = znajdź_najbliższe_trafienie_fotonu_wiodącego
(kierunek, geometria_sceny);
    // jeśli foton trafił w obiekt geometryczny
    if ( trafienie != null)
    {
        // jeśli foton wiodący trafił w powierzchnię
        // zwierciadlaną
        if( trafienie->typ == reflective && liczba_odbić > 0)
        {
            // wyznacz kierunek wektora odbitego
            odbity = odbij_wektor(trafienie);
            for (wszystkie fotony stowarzyszone w strumieniu)
            { // skoncentruj energię strumienia
                energia_fotonu_wiodącego +=
                    energia_fotonu_stowarzyszonego;
            }
        }
    }
}
```

```
usuń_fotony_stowarzyszone();
// śledź nowy strumień składający się tylko
// z 1 fotonu wiodącego
TraceStream(strumień, odbity,
geometria_sceny, mapa_strumieni,
liczba_odbić-1);
}
// jeśli foton wiodący trafił w powierzchnię refrakcyjną
if( trafienie->typ == refractive && liczba_odbić > 0)
{
    // wyznacz kierunek wektora załamane go
    załamany = załam_wektor(trafienie);
    // skoncentruj energię strumienia
    for (fotony_stowarzyszone)
    {
        energia_fotonu_wiodącego +=
            energia_fotonu_stowarzyszonego;
    }
    usuń_fotony_stowarzyszone();
    // śledź nowy strumień składający się tylko
    // z 1 fotonu wiodącego
    TraceStream(strumień, załamany, geometria_sceny,
mapa_strumieni, strumień, liczba_odbić-1);
}
// jeśli foton trafił w powierzchnię dyfuzyjną
else
{
    // wylosuj nowe pozycje docelowe fotonów stowarzyszonych
    // wokół punktu trafienia fotonu wiodącego
    // w promieniu strumienia
    for (fotony_stowarzyszone)
    {
        losuj_pozycje_docelowe_fotonu();
        testuj_przecięcie_promienia_fotonu();
        // sprawdź czy foton trafił w powierzchnię
        // dyfuzyjną oraz czy znalezione najbliższe
        // przecięcie jest w odległości mniejszej
        // od nowej pozycji fotonu wiodącego
        // niż promień strumienia
    }
}
```

```
if ( przecięcie z powierzchnią dyfuzyjna
    && odległość od trafienia < promień_strumienia)
{
    utwórz_foton_stowarzyszony_w_punkcie_przecięcia();
}
// jeśli nie, zablokuj foton stowarzyszony
else
{
    nie_propaguj_dalej_fotonu_stowarzyszonego();
}
}
// koniec pętli for
zapisz_strumien_fotonow_do_mapy_strumieni();
// odbij strumień
if( prawdopodobieństwo_odbicia && liczba_odbić>0)
{
    // po odbiciu od materiału przeskaluj energie
    // fotonu wiodącego oraz fotonów stowarzyszonych
    skaluje_energie_strumienia(materiał);
    // jeśli foton po odbiciu ma energie > 0
        if (energia_fotonu_wiodącego != 0)
        {
            // wyznacz kierunek wektora odbitego
            odbity = odbij_wektor(trafienie);
            TraceStream(strumień,
                        odbity,
                        geometria_sceny,
                        mapa_strumieni,
                        liczba_odbić-1);
        }
    }
    // koniec if
}
// koniec else
}
// koniec if
} // koniec funkcji
```

7. Rezultaty renderingu obrazów metodą strumieniowego mapowania fotonowego

Niniejszy rozdział prezentuje rezultaty renderingu obrazów z zastosowaniem autorskiej metody strumieniowego mapowania fotonowego. W tym celu za pomocą aplikacji renderującej opisanej w rozdziale 6 wykonano serię renderingów dla różnych scen testowych, na podstawie których przeprowadzono analizę metody strumieniowego mapowania fotonowego oraz dokonano porównania z klasyczną metodą mapowania fotonowego autorstwa Jensena (rozdział 3.3).

Obrazy uzyskane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego posłużyły następnie do przeprowadzenia testów percepcyjnych w celu subiektywnej oceny jakości obrazów w zależności od zmieniających się parametrów metody.

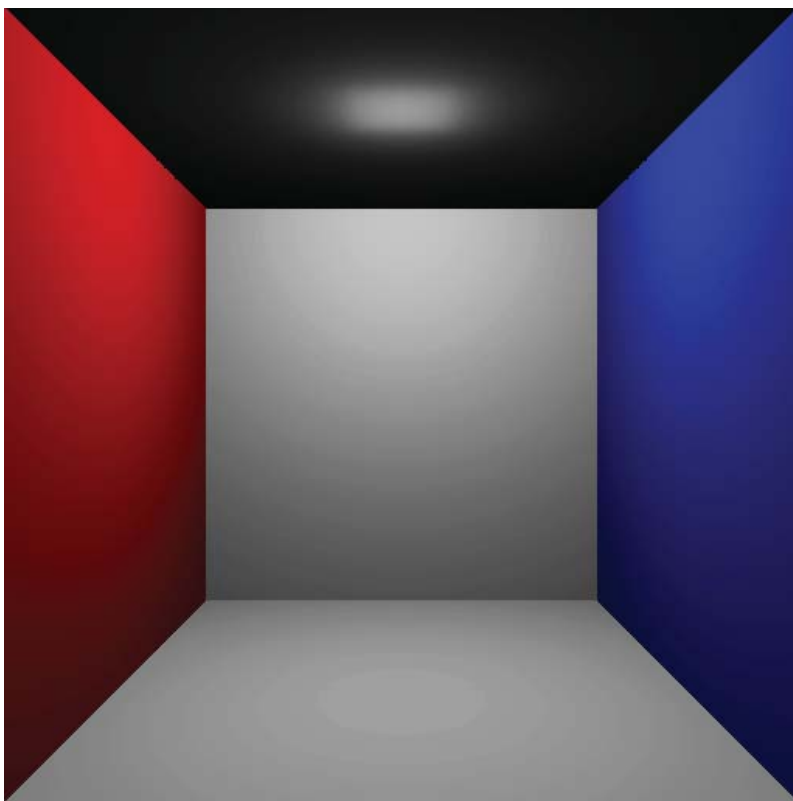
7.1. Sceny testowe

Dla wszystkich scen testowych wykorzystano jako środowisko obiekt typu Cornell Box [Gor84], o wymiarach 20 x 20 x 20 jednostek sceny (j.s.), światło powierzchniowe składające się z 25 światel punktowych rozlokowanych równomiernie na powierzchni o wymiarach 3 x 3 j.s. i kolorze białym (RGB: 1,1,1). Ścianom Cornell Boxa przypisano materiał dyfuzyjny, brak odbić zwierciadlanych (ang. specular reflection). Kolory odpowiednich ścian w modelu RGB:

- lewa – czerwony (1,0,0)
- prawa – niebieski (0,0,1)
- tylna, górna i dolna – biały (1,1,1)

Aby umożliwić uzyskanie dodatkowych odbić fotonów w scenie, doświetlając tym samym front obiektów ustawionych wewnątrz Cornell Boxa oraz uniknąć utraty fotonów, na czas procesu emisji i propagacji fotonów w scenie dostawiana była szósta ściana koloru białego zamykająca przestrzeń od frontu, która następnie była ukrywana na etapie renderingu z pozycji kamery, aby nie przesłaniać sceny.

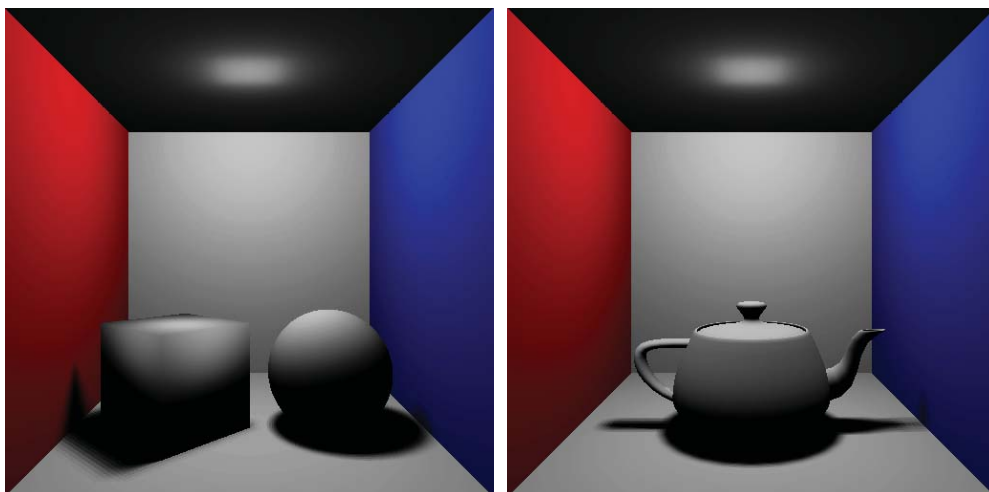
Rozdzielczość renderowanych obrazów testowych wynosiła 512 x 512 pikseli. Scena testowa bez dodatkowej geometrii, wyrenderowana z oświetleniem bezpośrednim (ang. direct illumination) za pomocą algorytmu śledzenia promieni z zastosowaniem modelu oświetlenia Phong, została przedstawiona na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Pusta scena testowa (Cornell Box) z oświetleniem bezpośrednim pochodzącym od powierzchniowego źródła światła

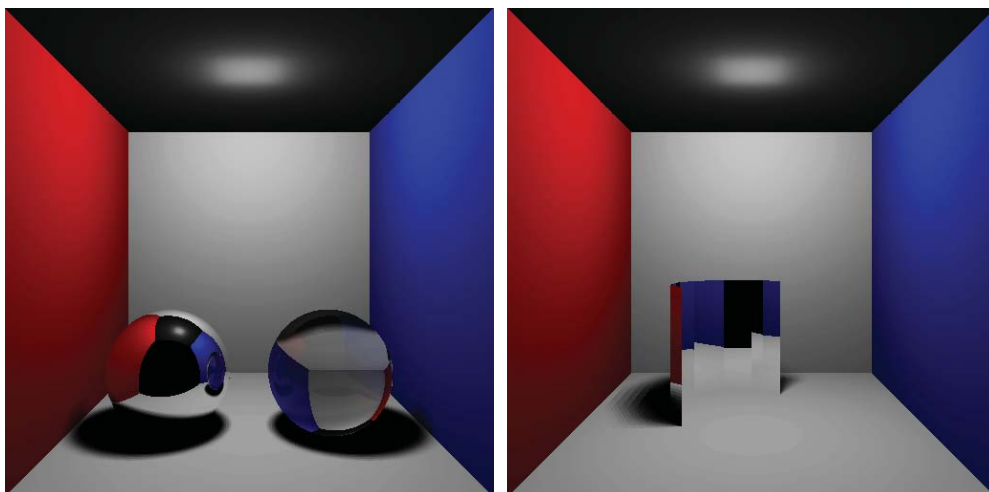
Sceny testowe dla różnych rodzajów materiałów:

- sceny dyfuzyjne (rys. 7.2):
 - sześcián o boku równym 7 j.s. składający się z 12 trójkątów i sfera będąca modelem parametrycznym o promieniu równym 3,5 j.s., materiał dyfuzyjny;
 - model Utah Teapot składający się z 1104 trójkątów, materiał dyfuzyjny.



Rys. 7.2. Dyfuzyjne sceny testowe z oświetleniem bezpośrednim: sześcian i sfera (po lewej) oraz Utah Teapot (po prawej)

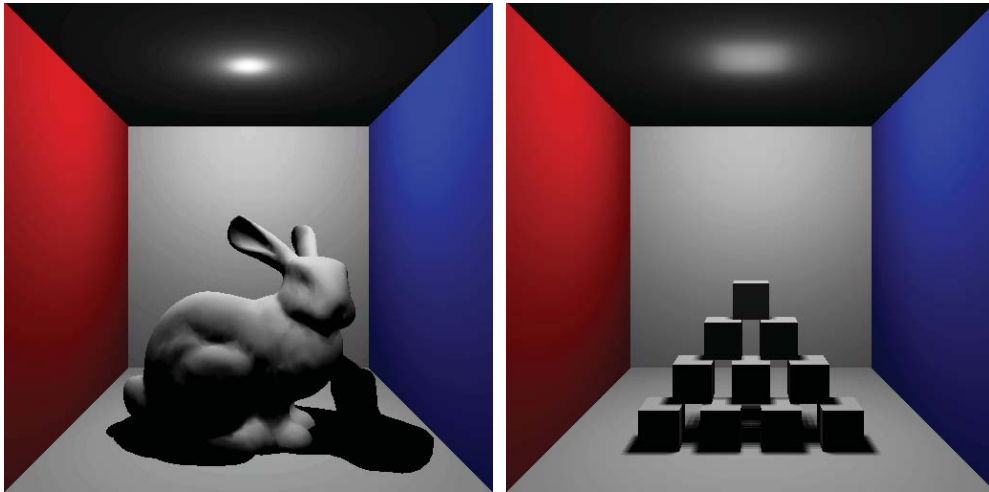
- sceny kaustyczne (rys. 7.3):
 - dwie sfery o promieniu równym 3,5 j.s.: zwierciadlana i refrakcyjna (współczynnik refrakcji $n = 1,5$);
 - zakrzywiona powierzchnia zwierciadlana o promieniu krzywizny 3,5 j.s.



Rys. 7.3. Po lewej scena do testowania efektów diakaustycznych z refrakcyjną kulą, po prawej scena do testowania efektów katakaustycznych z zakrzywioną powierzchnią lustrzaną, oświetlenie bezpośrednie

Sceny testowe dla różnych geometrii (rys. 7.4):

- pojedyncza złożona geometria: model Stanford Bunny, materiał dyfuzyjny, liczba wierzchołków 2503, liczba trójkątów 4968.
- nagromadzenie obiektów: 10 sześciątów o boku równym 2 j.s. ustawionych w piramidę, materiał dyfuzyjny.



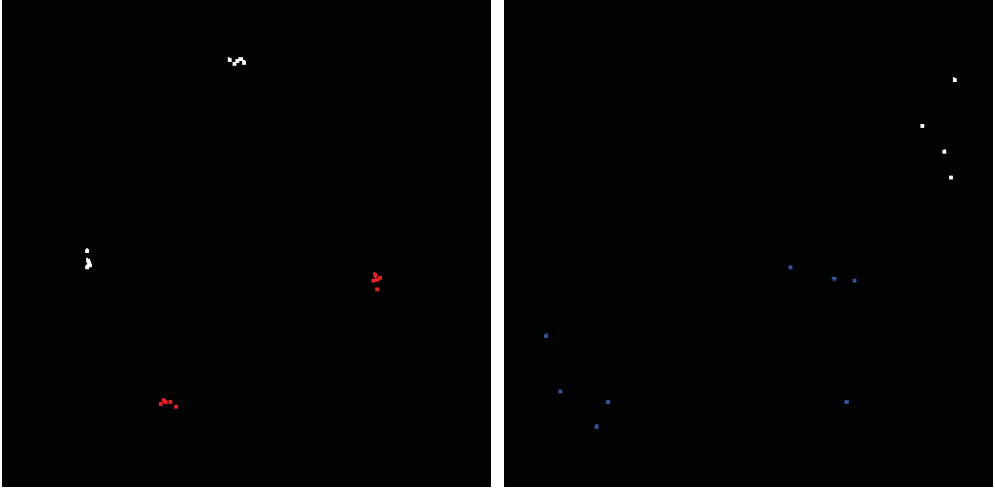
Rys. 7.4. Po lewej złożony model geometryczny (Stanford Bunny), po prawej nagromadzenie niewielkich modeli geometrycznych w bliskich odległościach, oświetlenie bezpośrednie

7.2. Wpływ parametrów metody na obraz

Poniższe rysunki prezentują rozkład fotonów i wyniki renderingu dla różnych konfiguracji następujących parametrów:

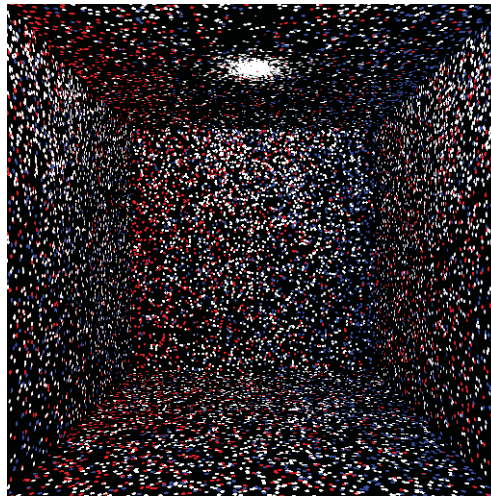
- n_s – liczba testowanych próbek dla piksela renderowanego obrazu (ang. number of samples),
- n_{fs} – liczba wyemitowanych strumieni fotonów (ang. number of emitted photon streams),
- n_{fa} – liczba fotonów stowarzyszonych w strumieniu (ang. number of associated photons),
- r_s – promień szerokości strumienia fotonów (ang. radius of photon stream),
- n_{fc} – liczba wyemitowanych fotonów kaustycznych (number of emitted caustic photons),
- m_r – dopuszczalna liczba odbić strumieni fotonów (ang. number of stream reflections).

Rysunek 7.5 przedstawia wizualizację rozkładu fotonów dla pustej sceny testowej w zależności od szerokości strumienia fotonów, dla jednego wyemitowanego ze źródła światła strumienia fotonów składającego się z 3 fotonów stowarzyszonych, przy dopuszczalnej liczbie odbić od powierzchni dyfuzyjnych równej 4.



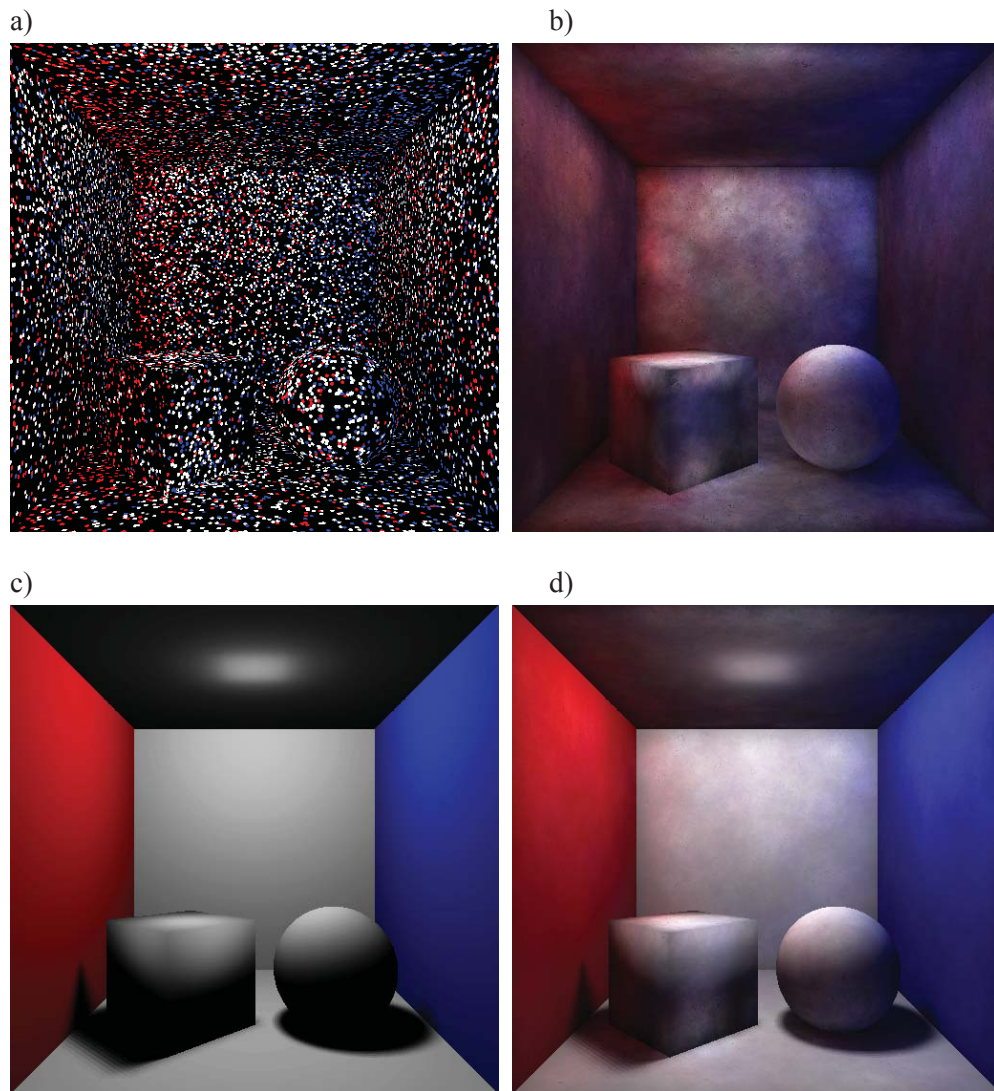
Rys. 7.5. Rozkład fotonów dla pustej sceny testowej w zależności od szerokości strumienia fotonów: po lewej $n_s=1, n_{fs}=1, n_{fc}=0, n_{fa}=3, r_s=0.5 \text{ j.s.}, m_r=4$; po prawej $n_s=1, n_{fs}=1, n_{fc}=0, n_{fa}=3, r_s=5 \text{ j.s.}, m_r=4$

Na rysunku 7.6 przedstawiono wizualizację rozkładu fotonów dla pustej sceny i wyemitowanych 1000 strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych dla promienia szerokości strumienia równego 2,5 j.s.



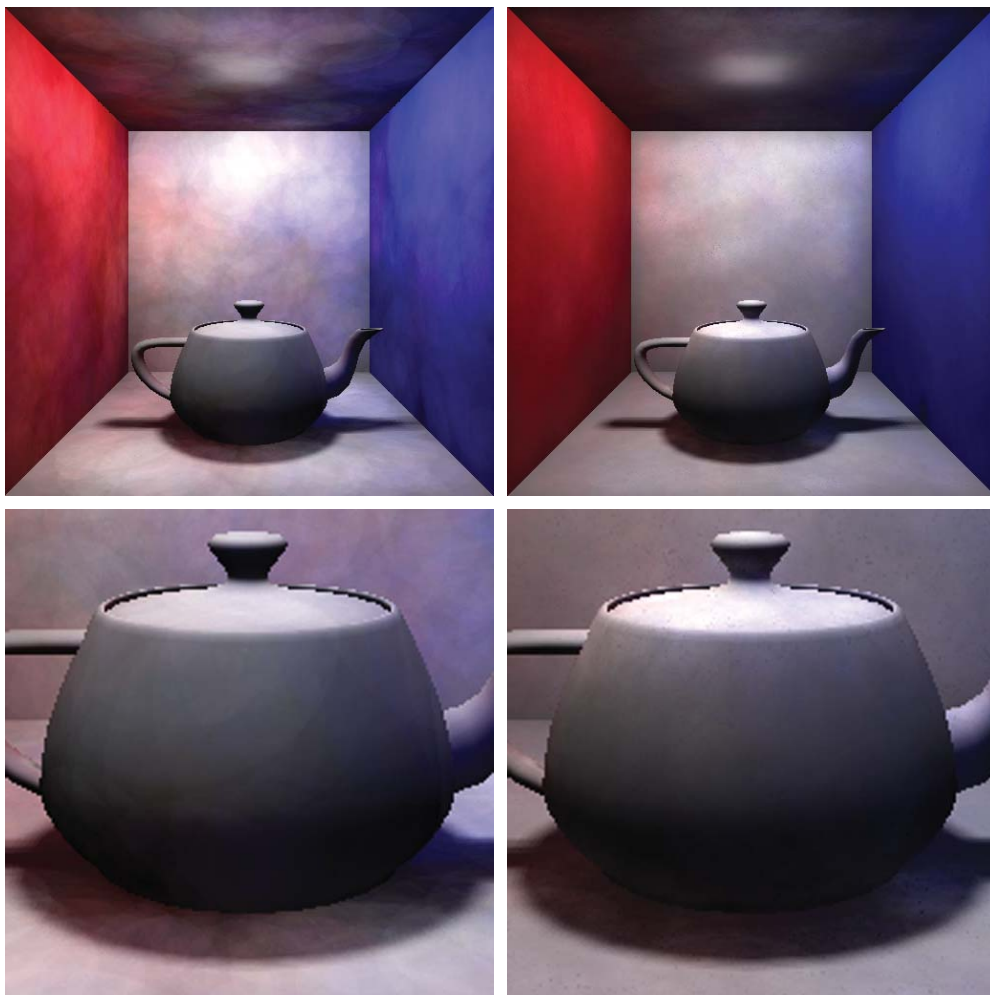
Rys. 7.6. Rozkład fotonów dla pustej sceny testowej: $n_s=1, n_{fs}=1000, n_{fc}=0, n_{fa}=10, r_s=2.5 \text{ j.s.}, m_r=4$

Na rysunku 7.7 przedstawiono rozkład fotonów w scenie testowej dyfuzyjnej (rys. 7.2) oraz wynik obliczeń globalnego oświetlenia będącego sumą oświetlenia bezpośredniego i pośredniego.

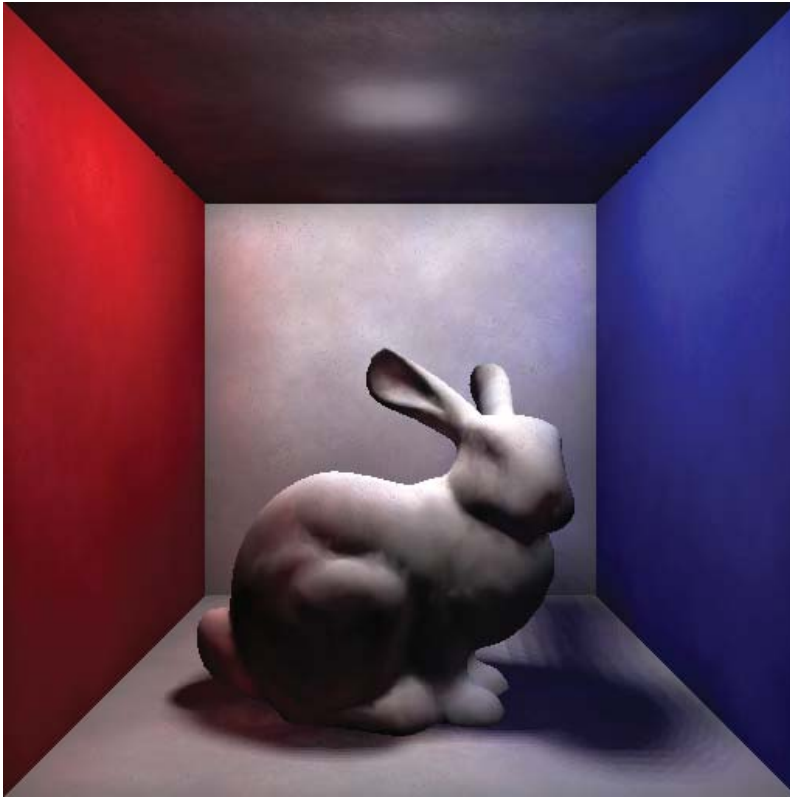


Rys. 7.7. Wynik obliczeń globalnego oświetlenia uzyskany dla sceny dyfuzyjnej z sześcianem i sferą:
 a) rozkład fotonów w scenie, b) wyrenderowana składowa oświetlenia pośredniego, c) scena
 z samym oświetleniem bezpośrednim, d) scena z oświetleniem bezpośrednim i pośrednim;
 $n_s=1, n_{fs}=10000, n_{fc}=0, n_{fa}=10, r_s=2.5 \text{ j.s.}, m_r=4$

Dla większej liczby wyemitowanych strumieni fotonów przy stałej liczbie fotonów stowarzyszonych w strumieniu widoczne jest wygładzone przenikanie kolorów wskutek oświetlenia pośredniego oraz dokładniejsze cieniowanie powierzchni (rys. 7.8). Rezultat renderingu sceny testowej dyfuzyjnej ze złożoną geometrią zaprezentowano na rysunku 7.9.

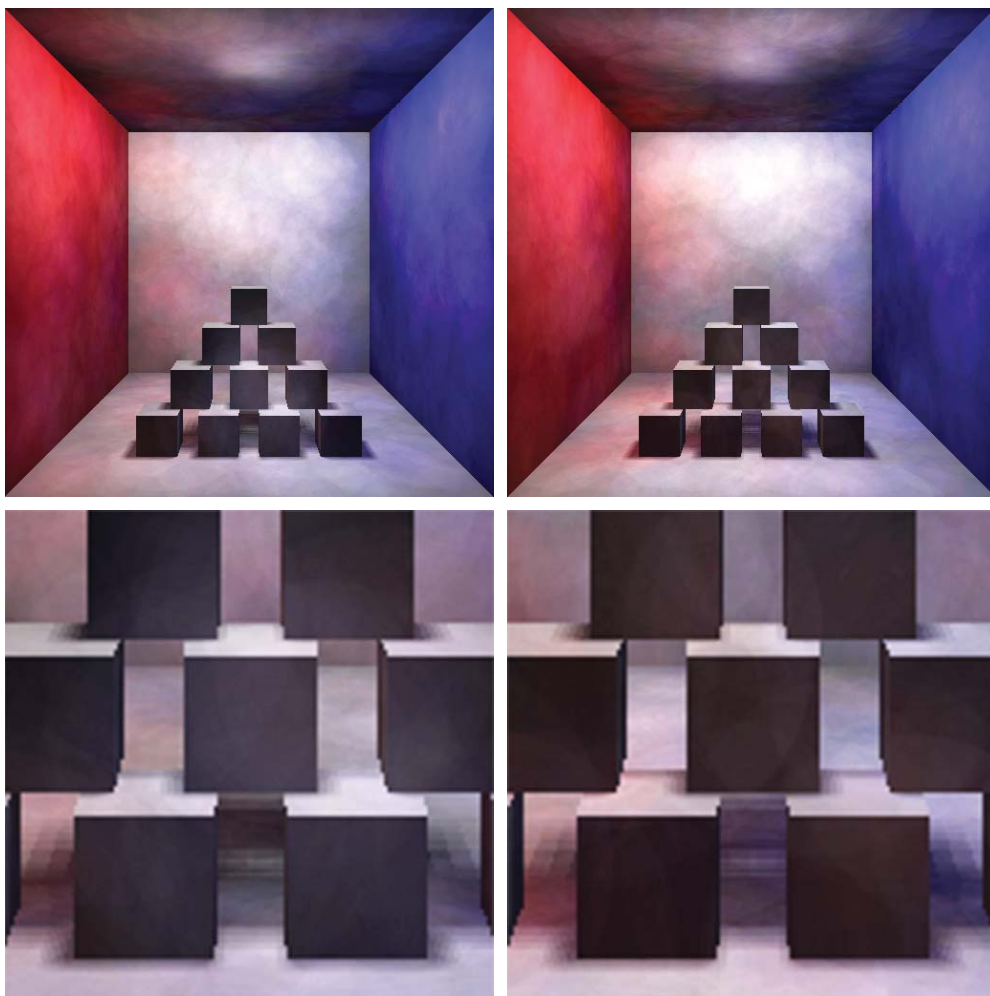


Rys. 7.8. Wyniki obliczeń globalnego oświetlenia w zależności od liczby wyemitowanych strumieni fotonów, uzyskane dla sceny dyfuzyjnej z czajnikiem: po lewej $n_s=1$, $n_{is}=1000$, $n_{ic}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$; po prawej $n_s=1$, $n_{is}=10000$, $n_{ic}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$



Rys. 7.9. Wynik obliczeń globalnego oświetlenia uzyskany dla sceny dyfuzyjnej z modelem Stanford Bunny: $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$

Fotony stowarzyszone strumieni o szerokości większej od rozmiarów rozpatrywanych obiektów geometrycznych w scenie są tłumione w większym stopniu niż w przypadku strumieni o mniejszej szerokości. W rezultacie można zaobserwować wyraźniejsze przenikanie kolorów spowodowane propagacją strumieni o mniejszej szerokości w szczelinach pomiędzy obiektami oraz równomierny rozkład fotonów na relatywnie małych powierzchniach (rys. 7.10).

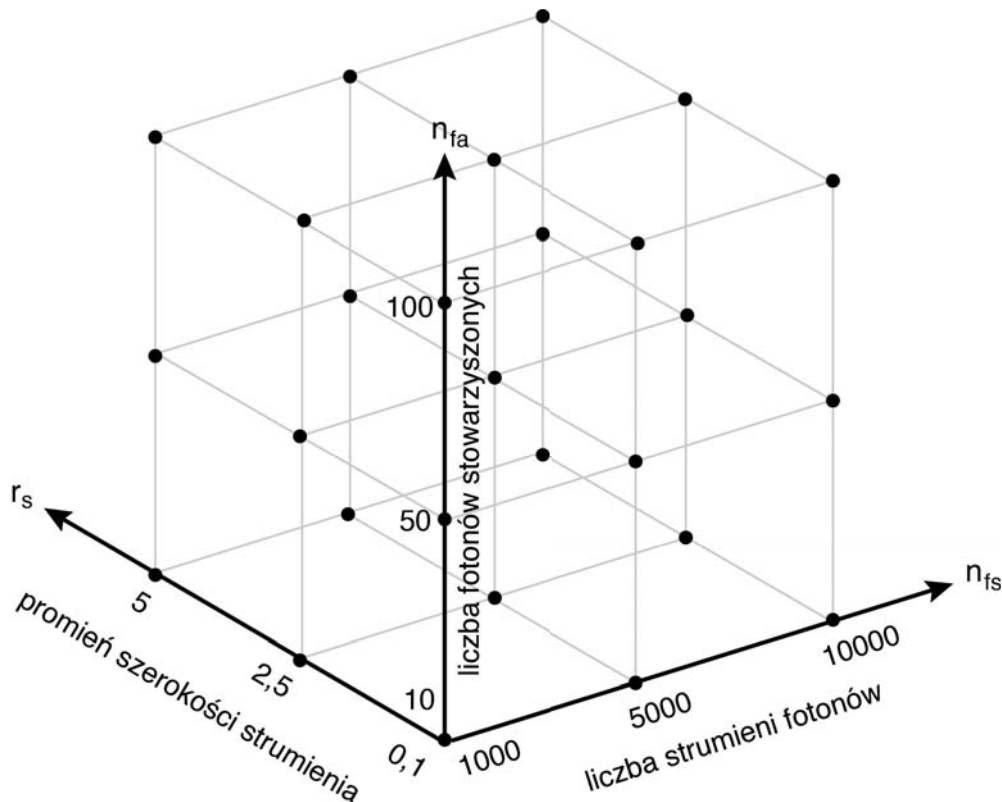


Rys. 7.10. Wyniki obliczeń globalnego oświetlenia w zależności od promienia szerokości strumienia, uzyskane dla sceny dyfuzyjnej z małymi obiektami w niewielkich odległościach: po lewej $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$; po prawej $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=0.1$ j.s., $m_r=4$

Dla wybranej sceny testowej (z rys. 7.2) zawierającej sześcian i sferę z przypisanym materiałem dyfuzyjnym przeprowadzono serię renderingu dla różnych wartości następujących parametrów:

- liczba strumieni fotonów,
- liczba fotonów stowarzyszonych,
- promień szerokości strumienia.

Powyższe parametry metody strumieniowego mapowania fotonowego równocześnie wpływają na wynikowy obraz i tworzą trójwymiarową przestrzeń parametrów (rys. 7.11)

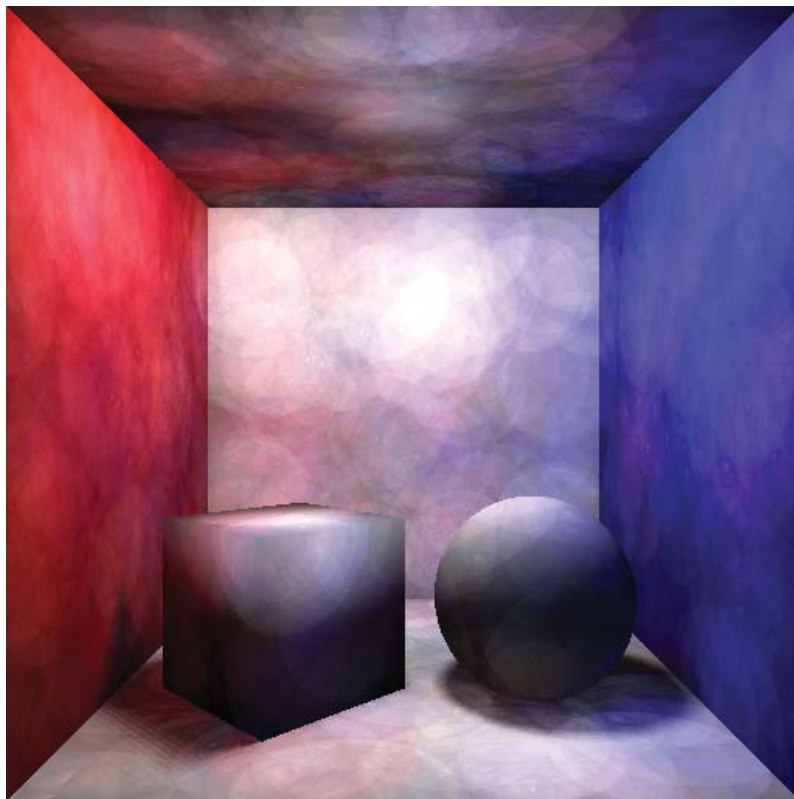


Rys. 7.11. Trójwymiarowa przestrzeń parametrów metody strumieniowego mapowania fotonowego; zaznaczono punkty dla których wygenerowane zostały obrazy do testów percepcyjnych

Doboru wartości dla poszczególnych parametrów metody dokonano przy ustalonych stałych wartościach renderingu sceny: promień wyszukiwania najbliższych strumieni równy 3 oraz liczba wyszukiwanych najbliższych strumieni równa 100. Maksymalna liczba odbić strumieni wynosiła 4. Wartości promienia szerokości strumienia zostały przyjęte w oparciu o wymiary sceny testowej (20x20x20 j.s.). Dla promienia powyżej wartości 5 j.s., strumień przyjmuje szerokość większą od połowy szerokości sceny, co skutkuje zbyt silnym uwydatnieniem przenikania kolorów w wyniku zbyt dużego rozrzutu fotonów stowarzyszonych dla strumienia.

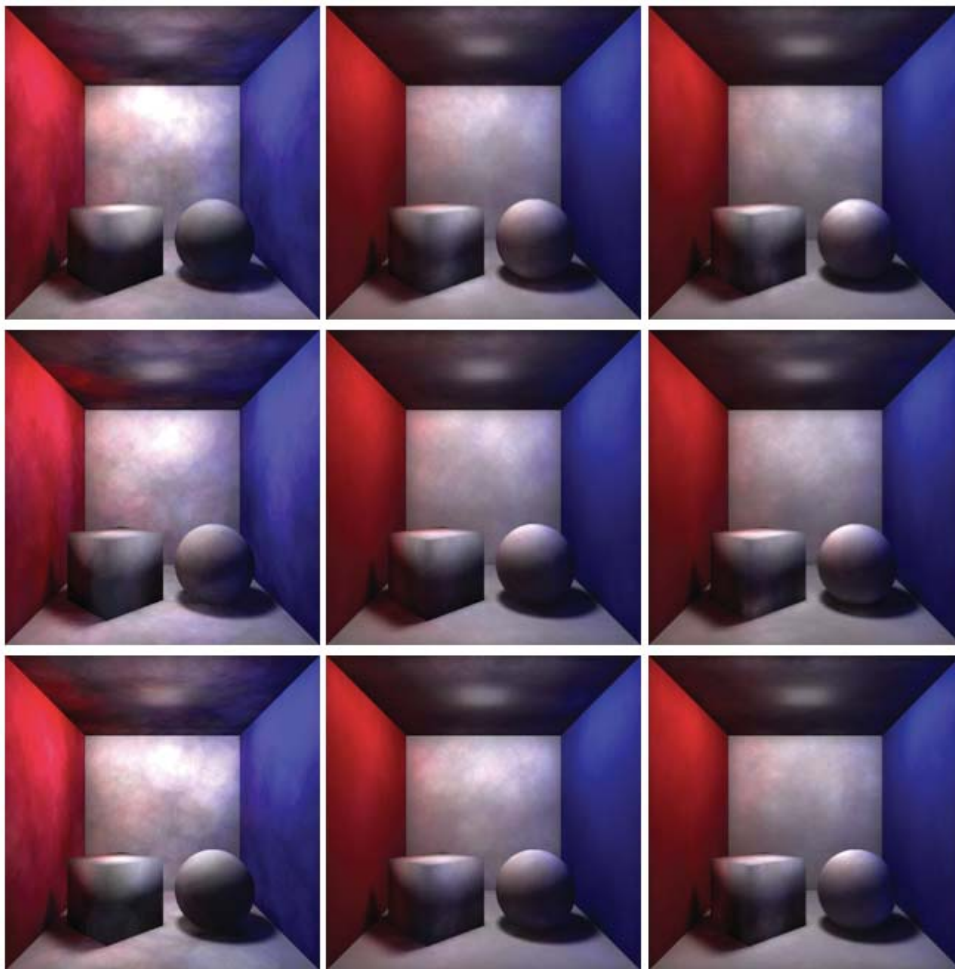
Wartości parametrów liczby strumieni (n_{fs}) oraz liczby fotonów stowarzyszonych w strumieniu (n_{fa}) zostały ustalone w taki sposób, aby uniknąć gwałtownych skoków

jakości renderowanych obrazów. Dla rozpatrywanej sceny testowej liczba strumieni poniżej 1000 powodowała występowanie znacznych artefaktów w postaci plam barwnych (rys. 7.12), w wyniku niedostatecznej liczby fotonów rozpropagowanych w scenie. Dla liczby strumieni powyżej wartości 10000 oraz liczby fotonów stowarzyszonych w strumieniach powyżej 100 poprawa jakości obrazów przy ustalonych wartościach renderingu była znikoma. Dla skrajnie małej liczby fotonów stowarzyszonych metoda strumieniowa zbliża się do standardowego mapowania fotonowego.



Rys. 7.12. Plamy barwne wynikające z niedostatecznej liczby wyemitowanych strumieni $n_s=500$ przy zbyt małym promieniu szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. w stosunku do wymiarów sceny.

Wybrany przekrój powyższej przestrzeni parametrów tworzący macierz 3 na 3 obrazów testowych dla ustalonej wartości promienia szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. zaprezentowano na rysunku 7.13. Wszystkie przekroje znajdują się w aneksie niniejszej monografii.

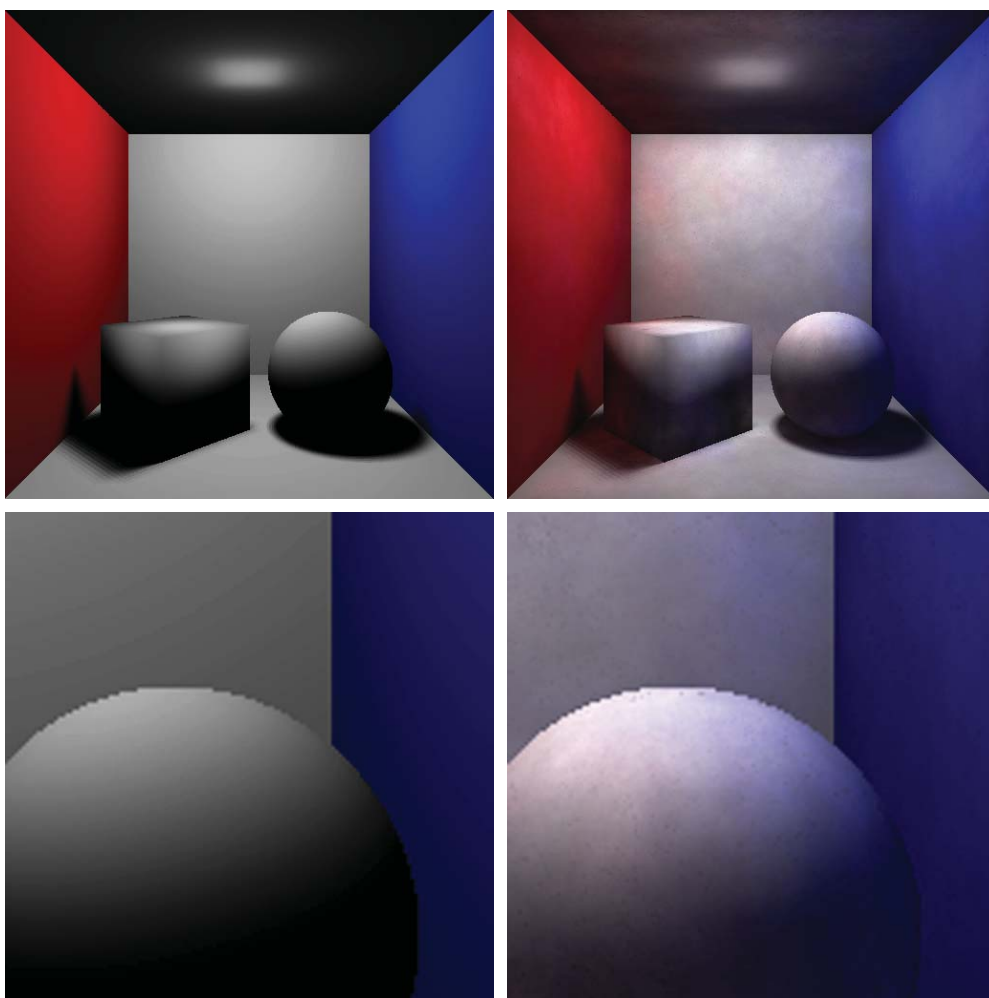


Rys. 7.13. Zestawienie obrazów testowych analizowanej przestrzeni parametrów dla stałej szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. Obrazy w wierszach różnią się liczbą strumieni kolejno od lewej: 1000, 5000, 10000. Obrazy w kolumnach różnią się liczbą fotonów stowarzyszonych, kolejno od dołu: 10, 50, 100

7.3. Uzyskane efekty globalnego oświetlenia

7.3.1. Przenikanie kolorów

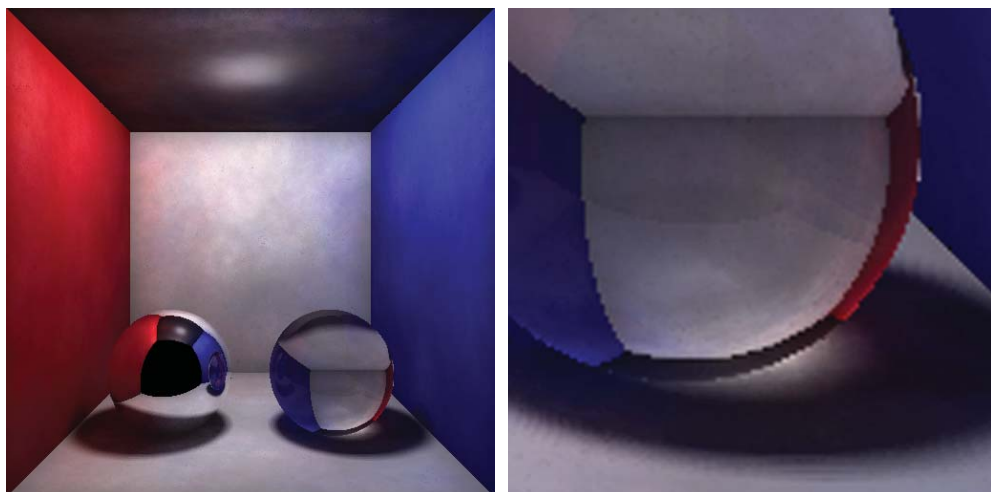
Na rysunku 7.14 zaprezentowano efekty przenikania kolorów (ang. color bleeding) wygenerowane dla dyfuzyjnej sceny testowej z sześcianem i sferą za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego. Efekt przenikania kolorów jest szczególnie wyraźny na stykających się powierzchniach oraz powierzchni sfery w zestawieniu z obrazem zawierającym wyłącznie oświetlenie bezpośrednie.



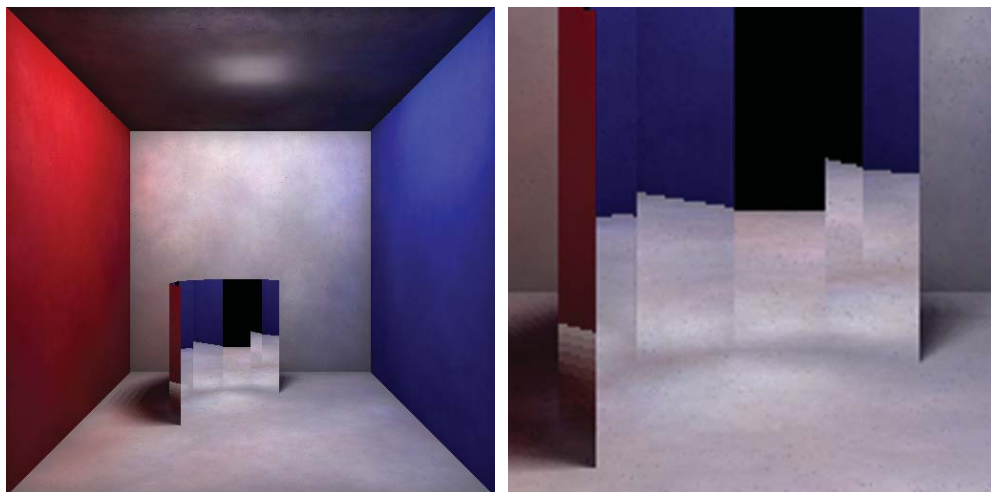
Rys. 7.14. Ta sama scena testowa dyfuzyjna z oświetleniem bezpośrednim bez efektu przenikania kolorów (po lewej) i z oświetleniem globalnym z widocznym efektem przenikania kolorów (po prawej) uzyskanym za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$

7.3.2. Efekty kaustyczne

Na rysunkach 7.15 i 7.16 zaprezentowano efekty kaustyczne wygenerowane dla sceny testowej (z rysunku 7.3) za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego, bez dodatkowej emisji fotonów kaustycznych i zastosowania map projekcji.



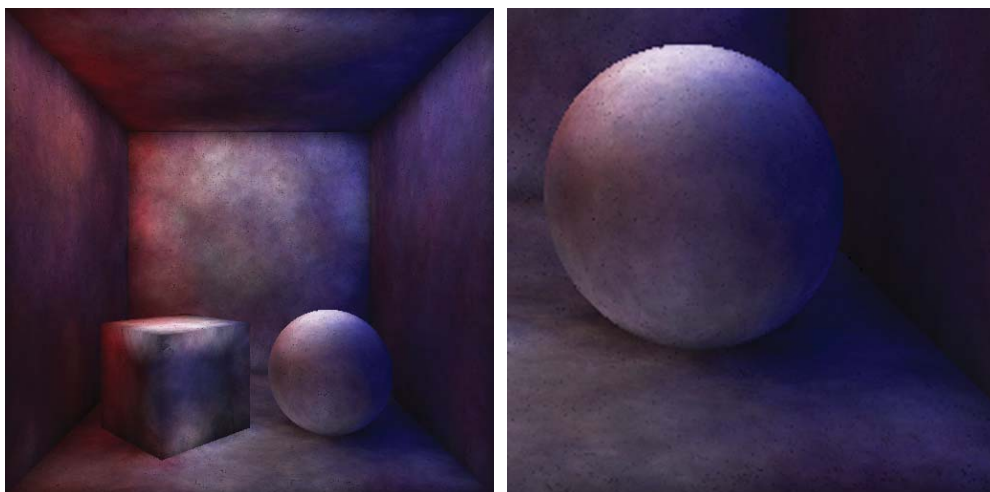
Rys. 7.15. Efekt diakaustyczny uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$



Rys. 7.16. Efekt katakaustyczny uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$

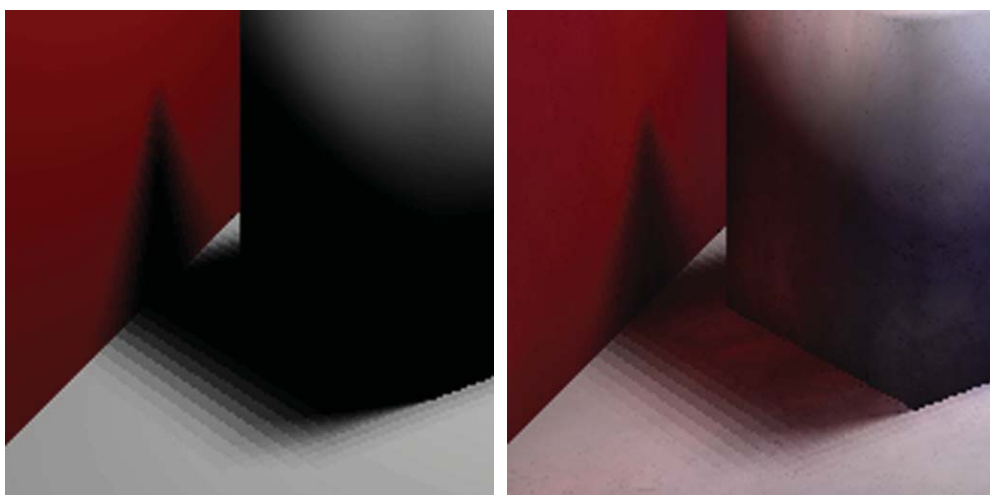
7.3.3. Miękkie cienie

Metoda strumieniowa pozwala uzyskać miękkie cienie wynikające z oświetlenia pośredniego. Na rysunku 7.17 zaprezentowano przykładowy rendering sceny testowej bez oświetlenia bezpośredniego. W obszarach, gdzie statystycznie dotarło najmniej odbitych fotonów, a więc w narożnikach sceny oraz bliskim sąsiedztwie obiektów geometrycznych powstają miękkie cienie.



Rys. 7.17. Efekt miękkich cieni widocznych w narożnikach sceny (po lewej) oraz pod sferą (po prawej) uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$

Miękkie cienie uzyskane za pomocą rozkładu strumieni fotonów w scenie wpływają na zwiększenie realizmu finalnego obrazu przez stopniowe rozjaśnienie i zabarwienie cieni uzyskanych w wyniku oświetlenia bezpośredniego (rys. 7.18).



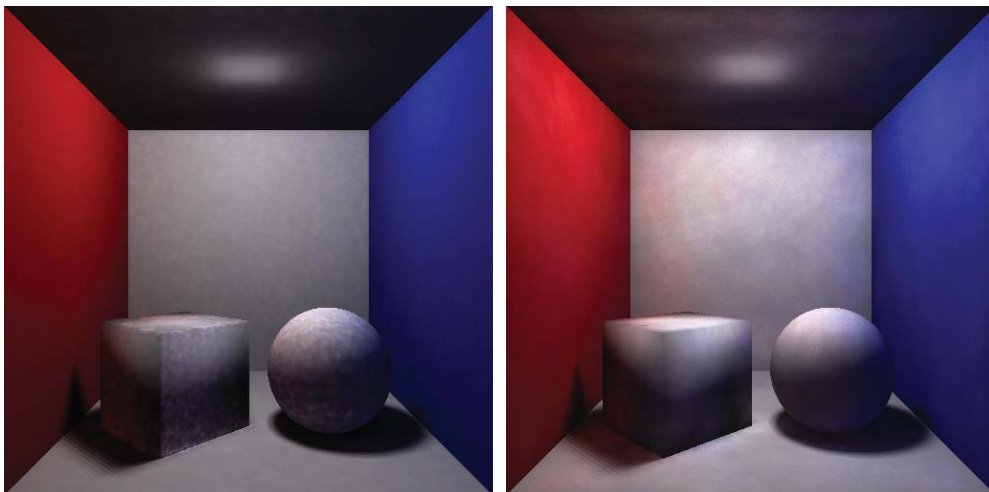
Rys. 7.18. Cień uzyskany przy oświetleniu bezpośrednim sceny (po lewej) i cień uzyskany przy globalnym oświetleniu sceny za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$

7.4. Porównanie klasycznej i strumieniowej metody mapowania fotonowego

Przy ustalonych jednakowych warunkach początkowych: dopuszczalnej liczbie odbić fotonów równej 4, promieniu wyszukiwania najbliższych fotonów równego 3 j.s., liczbie wyszukiwanych najbliższych fotonów równej 100, przeprowadzono porównanie obrazów sceny dyfuzyjnej oraz scen kaustycznych dla metody strumieniowego mapowania fotonowego oraz metody mapowania fotonowego.

Dla obrazów sceny dyfuzyjnej składającej się z sześciangu i sfery, dla tej samej całkowitej liczby wyemitowanych fotonów (tzn. miliona fotonów) uzyskanych metodą strumieniowego mapowania fotonowego (10000 strumieni po 100 fotonów stowarzyszonych) i metodą mapowania fotonowego zaobserwowano (rys. 7.19):

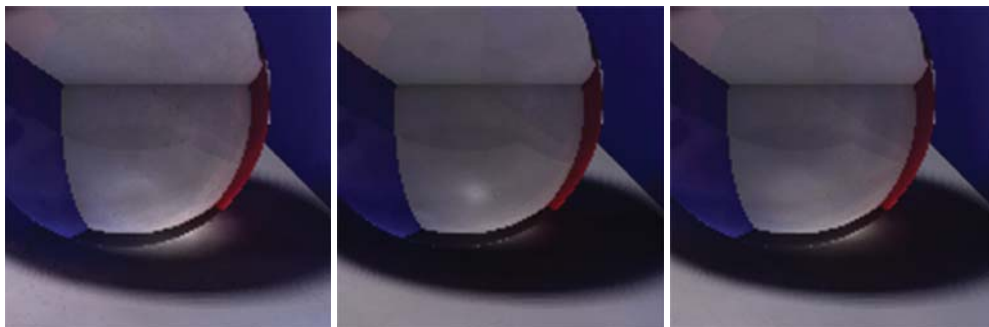
- wyraźniejsze przenikanie kolorów na powierzchniach sąsiadujących, szczególnie w obszarach cienia, w przypadku metody strumieniowej,
- większe wygładzenie plam barwnych obserwowalne na małych powierzchniach (sześciang i sfera) w przypadku metody strumieniowej,
- blisko trzykrotnie krótszy czas propagacji fotonów (45641 ms) dla metody strumieniowej w porównaniu do mapowania fotonowego (142491 ms).



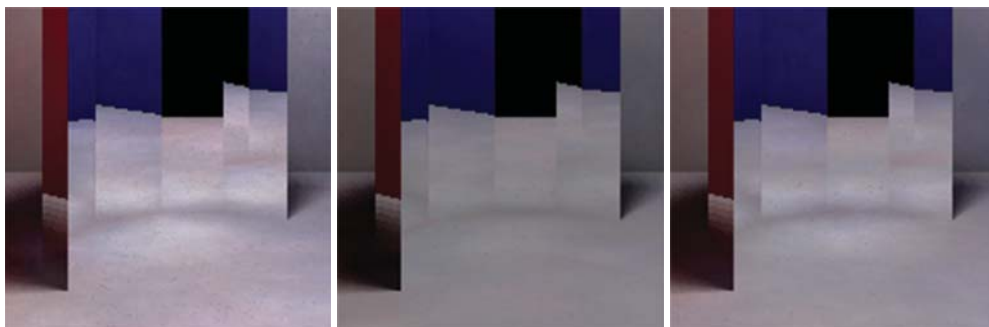
Rys. 7.19. Obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 10000000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{ja}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$ (po prawej)

Dla scen kaustycznych wykonano porównanie dla tej samej całkowitej liczby wyemitowanych fotonów metodą strumieniowego mapowania fotonowego (10000 strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych) i metodą klasycznego mapowania fotonowego (100000 fotonów).

Zarówno efekt diakaustyczny (rys. 7.20) jak i katakaustyczny (rys. 7.21) uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego jest wyraźniejszy niż za pomocą klasycznego mapowania fotonowego bez dodatkowej emisji fotonów kaustycznych. Aby klasyczną metodą mapowania fotonowego uzyskać zbliżone rezultaty do strumieniowego mapowania fotonowego konieczne jest zwiększenie liczby emitowanych fotonów lub emisja dodatkowych fotonów kaustycznych (rys. 7.20 i Rys. 7.21 prawe).



Rys. 7.20 Po lewej efekt diakaustyczny uzyskany metodą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 wyemitowanych strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych i promieniu szerokości strumienia równym 5 j.s., czas renderingu 90940 ms. Pośrodku efekt diakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów, czas renderingu 95421 ms. Po prawej efekt diakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów globalnych oraz dodatkowo 100000 fotonów kaustycznych, czas renderingu 105482 ms.



Rys. 7.21. Po lewej efekt katakaustyczny uzyskany metodą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 wyemitowanych strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych i promieniu szerokości strumienia równym 5 j.s., czas renderingu 101103 ms. Pośrodku efekt katakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów, czas renderingu 101794 ms. Po prawej efekt katakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów globalnych oraz dodatkowo 100000 fotonów kaustycznych, czas renderingu 111232 ms

7.5. Testy percepcyjne

Wizualna, subiektywna ocena jakości wygenerowanych komputerowo obrazów może zostać dokonana za pomocą testów percepcyjnych przeprowadzonych na grupie uczestników [Rad02]. Dla sceny testowej z sześcianem i sferą (rys. 7.2) dla wybranego obszaru z trójwymiarowej przestrzeni parametrów (rys. 7.11) przeprowadzono dwa testy percepcyjne.

TEST 1

Celem pierwszego testu percepcyjnego było ustalenie wpływu poszczególnych parametrów metody strumieniowego mapowania fotonowego na jakość generowanych obrazów. W wyniku pierwszego testu wyłoniono obrazy, które uzyskały najwyższą średnią ocen spośród grupy obrazów o tej samej całkowitej liczbie wyemitowanych fotonów. Obrazy te posłużyły następnie do przeprowadzenia drugiego testu percepcyjnego.

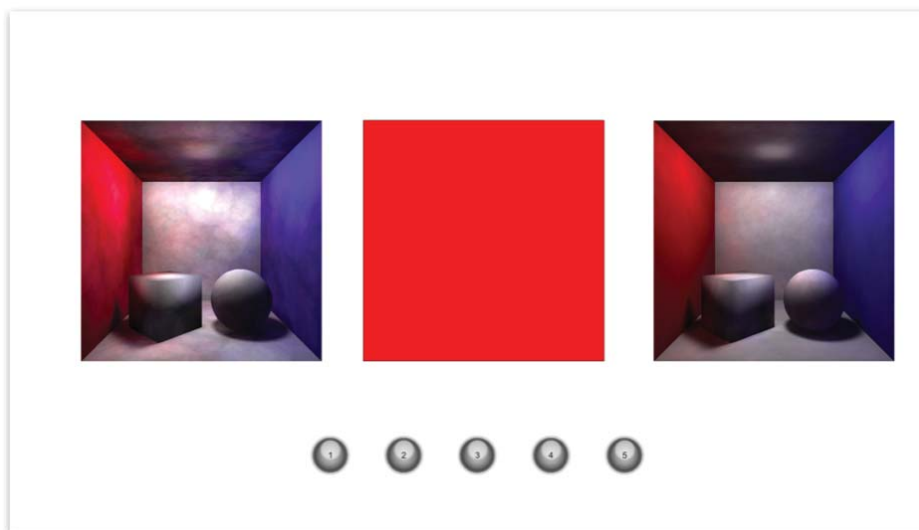
Test został przeprowadzony na dwóch grupach osób: specjaliści - studenci specjalności „grafika komputerowa i multimedia” (18 osób) oraz osoby nieobeznane z zagadnieniami komputerowej syntezy obrazów (20 osób). Wszystkie osoby biorące udział w teście były w przedziale wiekowym 19 - 24 lata.

Na potrzeby pierwszego testu wykonano prostą aplikację w technologii Adobe Flash pozwalającą na wyświetlanie zestawu przygotowanych obrazów testowych oraz ich ocenę przez użytkownika w skali od 1 do 5. Na ekranie monitora wyświetlane były jednocześnie trzy obrazy (rys. 7.22):

- obraz po lewej będący obrazem o najniższej jakości,
- obraz środkowy będący obrazem ocenianym,
- obraz po prawej będący obrazem o najlepszej jakości.

Obrazy środkowe wygenerowane zostały w losowej kolejności ze zmiennymi parametrami renderingu, które mają bezpośredni wpływ na ich jakość. Użytkownicy z obu grup testowych zostali poproszeni o ocenę każdego z obrazów środkowych w skali od 1 do 5, gdzie ocena 1 oznacza obraz najgorszej jakości (zbliżony do lewego obrazu), ocena 5 to obraz najlepszej jakości (zbliżony do prawego obrazu). Ocenę dokonywano przez kliknięcie w odpowiadające im przyciski na ekranie. Czas wyświetlania obrazów nie był determinowany. Udzielenie odpowiedzi powodowało wyświetlenie kolejnego obrazu. Kolejność wyświetlanych obrazów poddawanych ocenie była jednakowa dla wszystkich osób biorących udział w teście, aby nie miała wpływu na udzielone odpowiedzi [Lev94]. Udzielone oceny dla poszczególnych obrazów testowych zostały następnie zapisane do zewnętrznego pliku w formacie xml. Test został przeprowadzony przy jednakowych warunkach oświetlenia dla tej samej

matrycy ekranu o rozdzielczości 1920 x 1080 pikseli. Dystans od osoby biorącej udział w teście do monitora na którym wyświetlano obrazy wynosił 0,5 metra. Wzór formularza do testu pierwszego oraz zgody na uczestnictwo w teście znajduje się w aneksie niniejszej pracy.



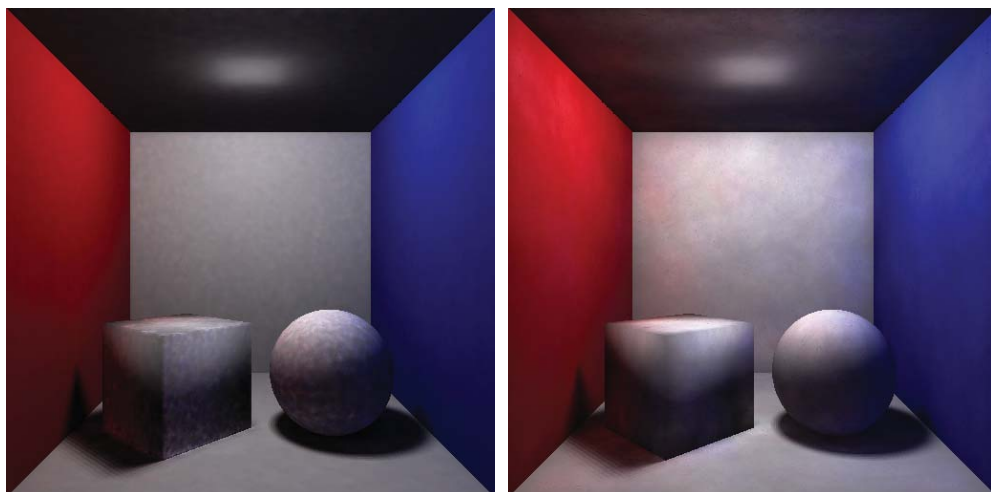
Rys. 7.22. Ekran aplikacji testującej

TEST 2

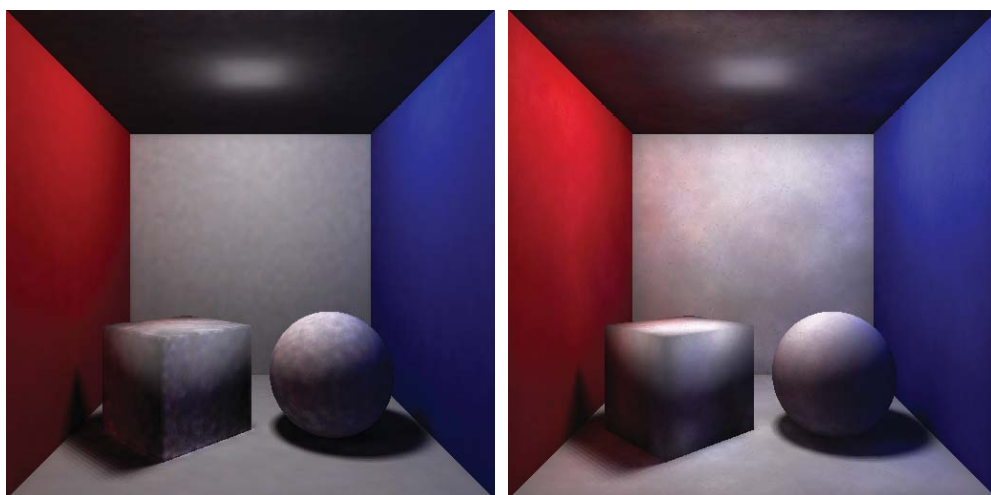
Obrazy wygenerowane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego, które uzyskały najwyższą średnią spośród grupy obrazów o tej samej całkowitej liczbie wyemitowanych fotonów (patrz podrozdział 7.6), porównano z obrazami wygenerowanymi za pomocą klasycznego mapowania fotonowego dla tej samej liczby fotonów. Celem testu drugiego było wskazanie, która z metod generuje obrazy o lepszej jakości dla takich samych liczb wyemitowanych fotonów.

Na monitorze wyświetlane zostały kolejno pary obrazów. Dla każdej pary obrazów (rys. 7.23-7.28) oznaczonej kolejnym numerem poproszono o wskazanie, który obraz (lewy czy prawy) w subiektywnej opinii oceniającego ma lepszą jakość. Czas wyświetlania każdej pary obrazów nie był determinowany.

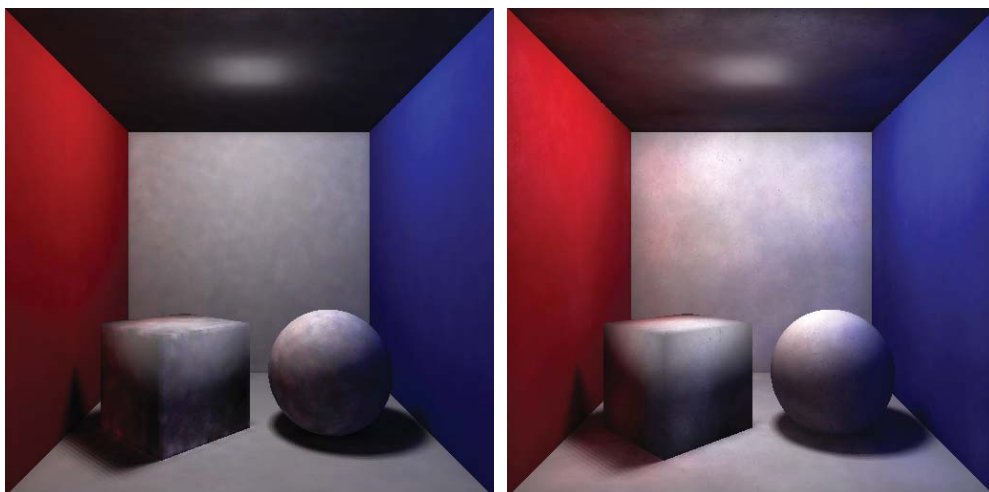
Warunki przeprowadzenia testu były takie same jak w przypadku testu pierwszego. Test został również przeprowadzony na dwóch grupach osób: specjaliści - studenci specjalności „grafika komputerowa i multimedia” (16 osób) oraz osoby nieobeznane z zagadnieniami cyfrowej syntezy obrazów (16 osób). W obu grupach były to osoby inne niż biorące udział w teście pierwszym. Wzór formularza do testu drugiego oraz zgody na uczestnictwo w teście znajduje się w aneksie niniejszej pracy.



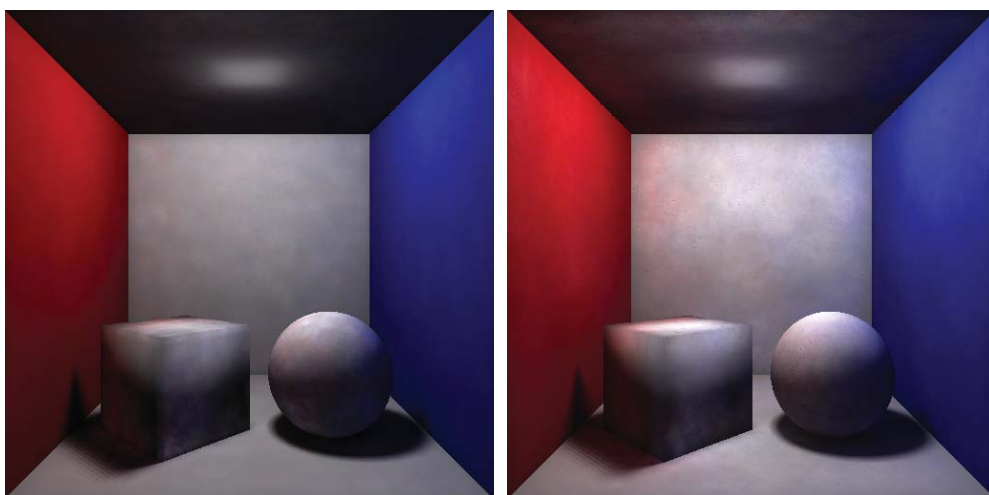
Rys. 7.23. Pierwsza para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 1000000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 100 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej)



Rys. 7.24. Druga para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 500000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 50 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej)



Rys. 7.25. Trzecia para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 250000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 5000 strumieni fotonów po 50 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej)



Rys. 7.26. Czwarta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej)



Rys. 7.27. Piąta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 50000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 5000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej)



Rys. 7.28. Szósta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 10000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 1000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej)

7.6. Analiza wyników testów percepcyjnych

Wyniki z pierwszego testu percepcyjnego oceniającego obrazy uzyskane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego w zależności od zmieniającego się zestawu parametrów zebrano w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Średnia ocena (w skali 1÷5) obrazów testowych wygenerowanych za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego w zależności od wartości parametrów metody

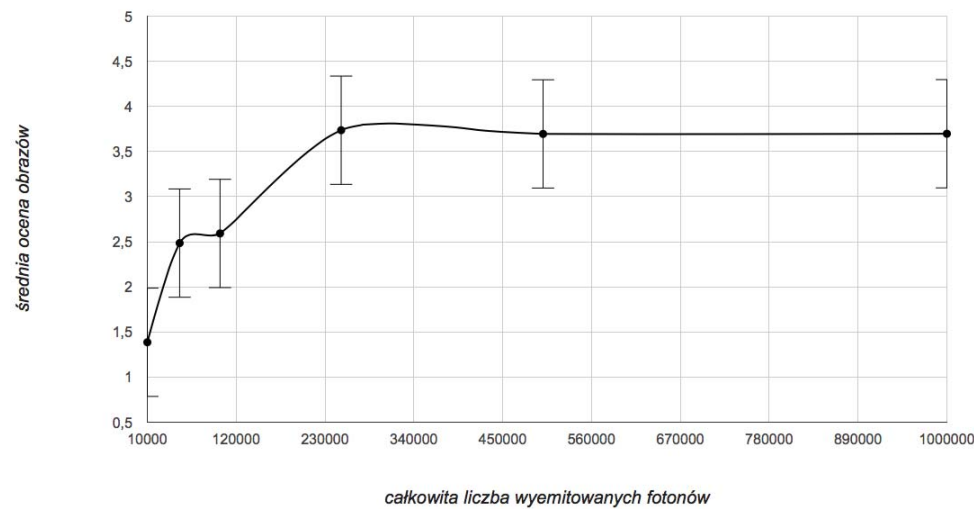
liczba strumieni	liczba fotonów słowarzyszonych	promień szer. strumienia [j.s.]	całkowita liczba fotonów	czas renderingu [ms]	średnia ocen specjalistów	średnia ocen nieobeznanych	średnia ocen wszystkich	średnie odchylenie
1000	10	0,1	10000	109145	1,111	1,105	1,108	0,228531856
1000	10	2,5	10000	112417	1,389	1,368	1,379	0,504155125
1000	10	5	10000	110528	1,556	1,789	1,673	0,657894737
1000	50	0,1	50000	140147	1,222	1,368	1,295	0,441828255
1000	50	2,5	50000	127024	1,389	1,526	1,458	0,541551247
1000	50	5	50000	123766	1,556	1,737	1,646	0,59833795
1000	100	0,1	100000	162173	1,333	1,474	1,404	0,540166205
1000	100	2,5	100000	153187	1,111	1,684	1,398	0,55401662
1000	100	5	100000	146197	1,667	1,789	1,728	0,698060942
5000	10	0,1	50000	135569	3,333	3,579	3,456	0,864265928
5000	10	2,5	50000	134633	3,667	3,368	3,518	0,684210526
5000	10	5	50000	129376	3,5	3,579	3,539	0,576177285
5000	50	0,1	250000	188443	3,611	3,789	3,7	0,872576177
5000	50	2,5	250000	176033	3,667	3,947	3,807	0,656509695
5000	50	5	250000	169893	3,611	3,789	3,7	0,749307479
5000	100	0,1	500000	258660	3,389	3,158	3,273	0,688365651
5000	100	2,5	500000	233209	3,5	3,684	3,592	0,728531856
5000	100	5	500000	218416	3,667	3,947	3,807	0,448753463
10000	10	0,1	100000	143087	3,278	3,684	3,481	0,657894737
10000	10	2,5	100000	140008	3,833	3,737	3,785	0,709141274
10000	10	5	100000	140765	3,833	3,684	3,759	0,71468144
10000	50	0,1	500000	200112	3,611	3,579	3,595	0,789473684
10000	50	2,5	500000	187067	4,222	3,684	3,953	0,670360111
10000	50	5	500000	179183	4,056	3,842	3,949	0,700831025
10000	100	0,1	1000000	268904	3,333	3,368	3,351	0,909972299
10000	100	2,5	1000000	245609	3,722	3,105	3,414	0,761772853
10000	100	5	1000000	231809	4,389	4,263	4,326	0,710526316

Odchylenie średnie średniej ocen dla każdego obrazu testowego jest mniejsze od 1 przy pięciostopniowej skali ocen, co oznacza wiarygodność uzyskanych wyników. Średnie oceny poszczególnych obrazów testowych są bardzo zbliżone dla obu grup testujących (specjaliści i nieobeznani) (tabela 7.1).

Wyższa liczba wyemitowanych fotonów przekłada się na wyższą średnią ocenę obrazów (tabela 7.2), jednakże tendencja wzrostu nie jest liniowa i powyżej 250000 wyemitowanych fotonów średnia ocena obrazów ulega niewielkim zmianom z uwzględnieniem średniego odchylenia (rys. 7.29).

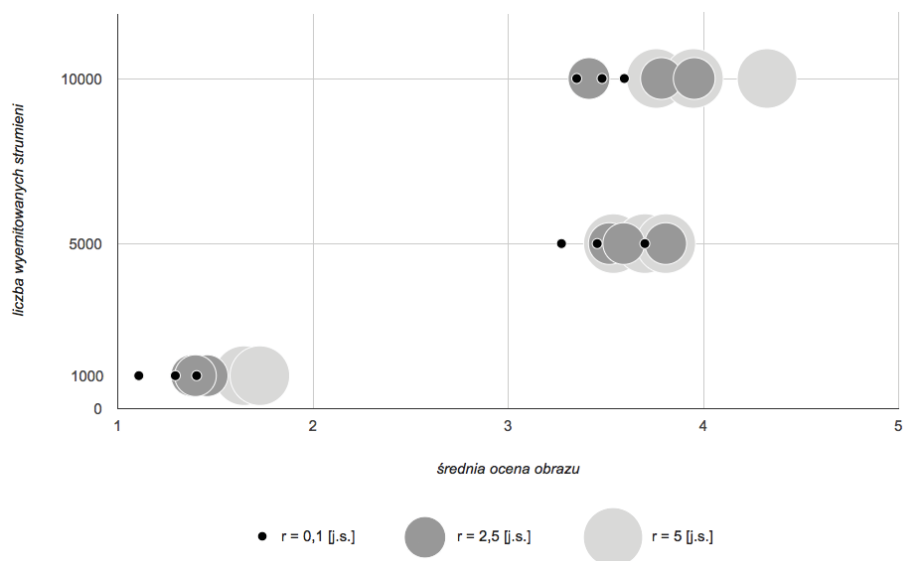
Tabela 7.2. Średnia ocena (z zakresu 1÷5) obrazów testowych wygenerowanych za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego w zależności od całkowitej liczby wyemitowanych fotonów

całkowita liczba wyemitowanych fotonów	średnia ocena obrazów
10000	1,386
50000	2,485
100000	2,592
250000	3,736
500000	3,695
1000000	3,697



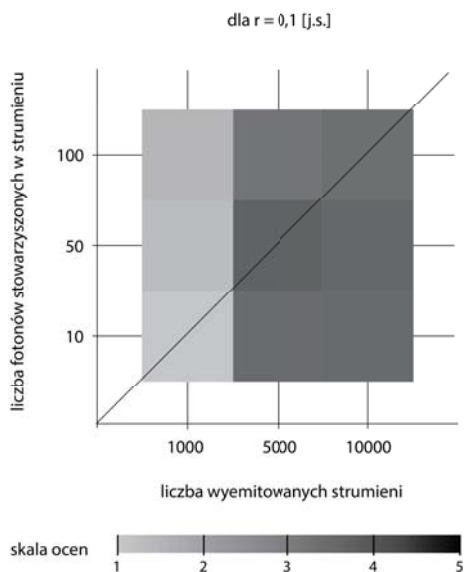
Rys. 7.29. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów w zależności od całkowitej liczby wyemitowanych fotonów

Wszystkie obrazy wygenerowane dla 5000 i 10000 strumieni fotonów uzyskały średnie oceny powyżej 3 (tabela 7.1) (rys. 7.30). Wśród obrazów o takiej samej liczbie wyemitowanych strumieni w większości wyższe oceny uzyskały obrazy o większych promieniach szerokości strumienia (rys. 7.30). Należy podkreślić, że dla małych promieni strumienia metoda upodabnia się do standardowego mapowania fotonowego.

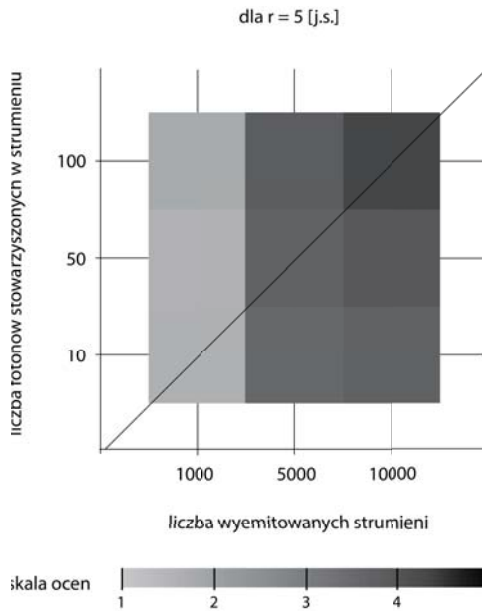


Rys. 7.30. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów testowych w zależności od liczby wemitowanych strumieni z uwzględnieniem szerokości strumienia

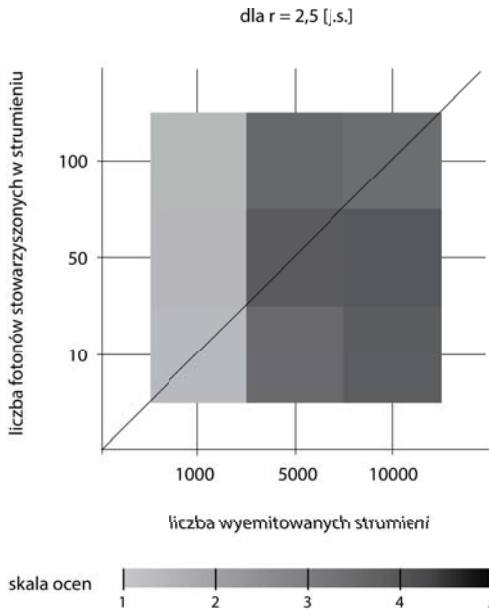
Zależność oceny obrazów testowych od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, przedstawiono dla poszczególnych szerokości strumienia na rysunkach 7.31 - 7.33.



Rys. 7.31. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadraty w skali odcieni szarości) w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 0,1 j.s.



Rys. 7.32. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadraty w skali odcieni szarości) w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 2,5 j.s.



Rys. 7.33. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadraty w skali odcieni szarości) w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 5 j.s.

Na podstawie rysunków 7.31-7.33 można zaobserwować, że dla mniejszych wartości całkowitej liczby wyemitowanych fotonów, wyższe oceny uzyskały obrazy o większej liczbie strumieni i mniejszej liczbie fotonów stowarzyszonych niż obrazy z mniejszą liczbą strumieni i większą liczbą fotonów stowarzyszonych (tabela 7.1). Wynika to z faktu, że dla niewielkiej liczby strumieni zbyt duża liczba fotonów stowarzyszonych wprowadza znaczny szum na renderowanym obrazie. Dla całkowitej liczby fotonów powyżej 250'000 średnia ocena obrazu nie jest znacząco różnicowana w zależności od proporcji pomiędzy liczbą strumieni a liczbą fotonów stowarzyszonych.

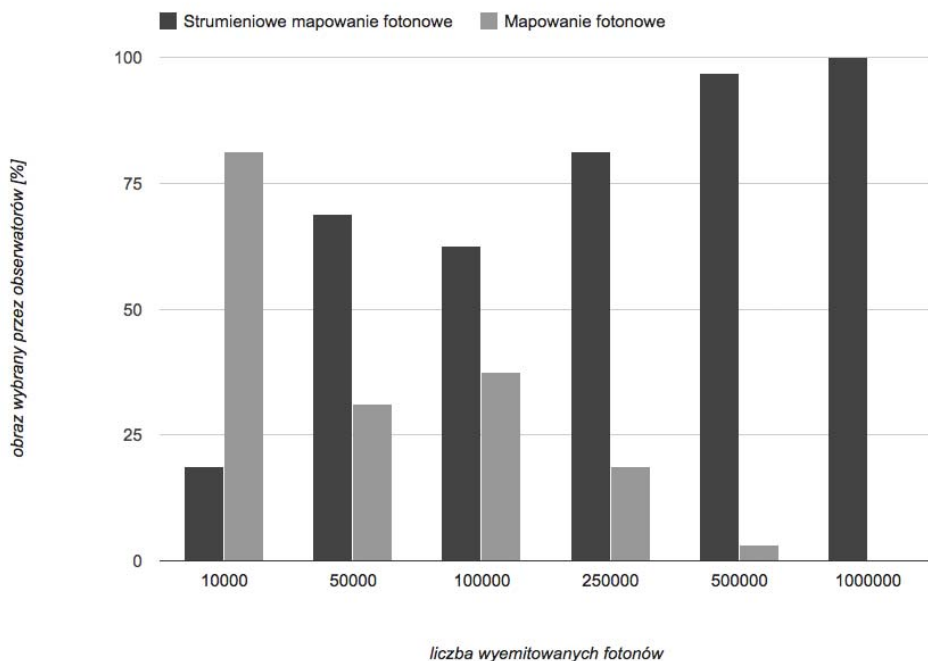
Wyniki drugiego testu percepcyjnego porównującego obrazy wygenerowane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego i klasycznego mapowania fotonowego przedstawiono w tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Wyniki testu percepcyjnego porównującego klasyczne mapowanie fotonowe i strumieniowe mapowanie fotonowe; pm – klasyczne mapowanie fotonowe, spm – strumieniowe mapowanie fotonowe

para	obraz	metoda	całkowita liczba fotonów	liczba strumieni	liczba fotonów stowarzyszonych	promień szer. strumienia	czas renderingu [ms]	specjaliści (%)	nieobeznani (%)	razem (%)
1	lewy	pm	1000000	-	-	-	148694	0	0	0
	prawy	spm	1000000	10000	100	5	231809	100	100	100
2	lewy	pm	500000	-	-	-	144748	0	6,25	3,125
	prawy	spm	500000	10000	50	2,5	187067	100	93,75	96,875
3	lewy	pm	250000	-	-	-	140676	18,75	18,75	18,75
	prawy	spm	250000	5000	50	2,5	176033	81,25	81,25	81,25
4	lewy	pm	100000	-	-	-	138633	37,5	37,5	37,5
	prawy	spm	100000	10000	10	2,5	140008	62,5	62,5	62,5
5	lewy	pm	50000	-	-	-	137054	37,5	25	31,25
	prawy	spm	50000	5000	10	5	129376	62,5	75	68,75
6	lewy	pm	10000	-	-	-	128245	93,75	68,75	81,25
	prawy	spm	10000	1000	10	5	110528	6,25	31,25	18,75

Odpowiedzi udzielone przez uczestników testu dla par 1-4 niemalże pokrywają się w obu grupach (specjaliści i nieobeznani) (tabela 7.3). W przypadku pary 5 i 6, proporcje odpowiedzi w grupie osób nieobeznanych są korzystniejsze dla obrazów wygenerowanych za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego niż w grupie specjalistów (tabela 7.3). Na obrazach tych występują wyraźne artefakty w postaci

plam barwnych, jednakże efekty przenikania kolorów są wyraźniejsze niż na porównywanych obrazach wygenerowanych za pomocą klasycznego mapowania fotonowego. Wyniki z tabeli 7.3 dla wszystkich uczestników testu przedstawiono w postaci graficznej na wykresie (rys. 7.34).



Rys. 7.34. Wykres przedstawiający preferowany przez obserwatorów obraz w zależności od liczby wyemitowanych fotonów

Z zaprezentowanych wyników (rys. 7.34) widać, że we wszystkich parach testowych oprócz tej z najmniejszą liczbą fotonów, obrazy wygenerowane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego przez większość uczestników testu zostały ocenione jako znacząco lepsze niż obrazy wygenerowane za pomocą mapowania fotonowego dla tej samej łącznej liczby fotonów wyemitowanych ze źródła światła.

W przypadku pary obrazów renderowanych dla 1000000 fotonów, 100% uczestników testu wybrało obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego. Obraz ten charakteryzuje się wyraźniejszym efektem przenikania kolorów niż obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego oraz mniej widoczną plamistością obserwowalną szczególnie na mniejszych powierzchniach.

Na podstawie ocen uczestników badania można wnioskować, że większą wagę przywiązywano do jakości obiektów pierwszoplanowych (sfera i sześcian) niż do drugiego planu (tutaj tylna ściana Cornell Box). Obrazy wygenerowane za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego odznaczające się mniejszym szumem na sferze i sześcianie niż obrazy generowane za pomocą klasycznego mapowania fotonowego były oceniane jako obrazy o lepszej jakości, pomimo widocznych plam na tylnej ścianie Cornell Box.

8. Podsumowanie

8.1. Podsumowanie wyników

Proponowana metoda strumieniowego mapowania fotonowego realizuje globalny model oświetlenia za pomocą nowatorskiej koncepcji powiązania fotonów w strumieniu już na początku procesu propagacji. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest odwzorowanie mechanizmu tłumienia strumienia fotonów zgodnego z rzeczywistym zachowaniem światła, a także usprawnienie algorytmu wyszukiwania najbliższych sąsiadów przez wcześniejsze powiązanie fotonów w strumieniu. Badania zostały przeprowadzone na zestawie scen testowych bazujących na modelu Cornell Box dla powierzchni dyfuzyjnych, zwierciadlanych i refrakcyjnych.

Metoda strumieniowa uwydatnia lepiej niż metoda klasyczna rendering efektu przenikania kolorów w wyniku uwzględniania wartości rozkładu fotonów na powierzchniach sąsiadujących w obszarze szerokości strumienia fotonów.

Zaletą metody strumieniowego mapowania fotonowego jest również uwydatnienie renderingu zjawisk kaustycznych przez koncentrację strumieni w przypadku napotkania powierzchni zwierciadlanych lub refrakcyjnych. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wyraźniejszych rezultatów niż za pomocą metody klasycznej, bez dodatkowej emisji fotonów kaustycznych i zastosowania map projekcji.

Opracowana metoda nie wyklucza zastosowania algorytmu progresywnego mapowania fotonowego [Hac08] ograniczającego zapotrzebowanie na pamięć potrzebną do przechowywania mapy fotonów.

Podobnie jak w przypadku klasycznej metody mapowania fotonowego, metoda strumieniowa stwarza możliwość zastosowania funkcji gęstości jądra (ang. kernel

density function) w celu bardziej precyzyjnego oszacowania gęstości energii strumieni w rozpatrywanym punkcie (na przykład: Gauss, Epanechnikov [Sil86]).

Metoda strumieniowa sprawdza się przy relatywnie dużych ilościach wyemitowanych fotonów. Przy wyemitowaniu niewielu fotonów artefakty generowane przez metodę strumieniową są wyraźniejsze niż w przypadku metody klasycznej mapowania fotonowego.

Najlepsze efekty renderingu z zastosowaniem metody strumieniowego mapowania fotonowego można uzyskać dla strumieni o szerokości zbliżonej do rozmiarów obiektów geometrycznych i przestrzeni pomiędzy nimi. Należy podkreślić, że dla strumieni o bardzo małej szerokości oraz niewielkiej liczbie fotonów stowarzyszonych metoda upodabnia się do klasycznego mapowania fotonowego.

Dla mniejszych wartości całkowitej liczby wyemitowanych fotonów, uczestnicy testów percepcyjnych ocenili wyżej obrazy o większej liczbie strumieni i mniejszej liczbie fotonów stowarzyszonych niż obrazy z mniejszą liczbą strumieni i większą liczbą fotonów stowarzyszonych. Zbyt duża liczba fotonów stowarzyszonych dla niewielkiej liczby wyemitowanych strumieni wprowadza znaczne plamy barwne na renderowanym obrazie. Wyższa liczba wyemitowanych strumieni przekłada się na wyższą średnią ocenę obrazów przez widzów. Dla całkowitej liczby fotonów powyżej 250'000 średnia ocena obrazu nie jest znacząco zróżnicowana w zależności od proporcji pomiędzy liczbą strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych.

Wyniki testów percepcyjnych pokazują, że obrazy wygenerowane za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego (z wyjątkiem prób z najmniejszą liczbą fotonów) przez większość uczestników testu zostały ocenione jako znacząco lepsze niż obrazy wygenerowane za pomocą mapowania fotonowego dla tej samej łącznej liczby fotonów wyemitowanych ze źródła światła. W przypadku pary obrazów renderowanych dla 1'000'000 fotonów, 100% uczestników testu wybrało obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego. Obraz ten charakteryzuje się zdecydowanie wyraźniejszym efektem przenikania kolorów niż obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego oraz mniej widoczną plamistością obserwowalną szczególnie na mniejszych powierzchniach.

8.2. Dalsze kierunki badań

Wykonane prace wyznaczają kilka obszarów badań, które w opinii autora niniejszej monografii wydają się być interesujące w kontekście dalszego rozwoju metody strumieniowego mapowania fotonowego.

Pierwszym proponowanym krokiem jest implementacja metody strumieniowego mapowania fotonowego za pomocą algorytmów dedykowanych dla procesorów graficznych (GPU) w celu przyspieszenia procesu generacji obrazu [Tom07].

Następnym kierunkiem badań byłaby analiza działania metody strumieniowej w połączeniu z algorytmem ostatecznego zbierania (ang. Final Gather) [Sei05] w celu redukcji szumu renderowanego obrazu.

Interesującym zagadnieniem wydaje się również analiza numeryczna szumu (przy zastosowaniu obiektywnych miar oceny jakości obrazu np. PSNR) powstającego na obrazach renderowanych za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego, w odniesieniu do metody klasycznej mapowania fotonowego oraz metod bazujących na zasadzie próbkowania punktowego (patrz rozdział 3.1).

9. Bibliografia

- [Aba81] Abadie, D., *Amerykański hiperrealizm*, Warszawa, Wydawnictwo Arkady, 1981.
- [Ant11] van Antwerpen, D., *Unbiased physically based rendering on the GPU*, Master thesis, Technical University Delft, Delft, The Netherlands, 2011.
- [App68] Appel, A., *Some techniques for shading machine rendering of solids*, AFIPS 1968 Spring Joint Computer Conference Proceedings, Vol. 32, 1968, s. 37-45
- [Arv03] Arvo, J., Dutré, P., Keller, A., Jensen, H. W., Owen, A., Pharr, M., Shirley, P., *Monte carlo ray tracing*, Technical report, SIGGRAPH 2003 Course Notes, Course #44: Monte Carlo Ray Tracing, 2003.
- [Ash94a] Ashdown, I., *Radiosity: A Programmer's Perspective*, New York, John Wiley & Sons, 1994.
- [Ash94b] Ashdown, I., Eng, P., LC, FIES. *Photometry and Radiometry. A Tour Guide for Computer Graphics Enthusiasts*, John Wiley & Sons, 1994.
- [Ben75] Bentley, J. L., *Multidimensional binary search trees used for associative searching*, Communications of the ACM, vol. 18, no. 9, 1975, s. 509-517.

- [Bit99] Bittner, J., *Hierarchical techniques for visibility determination*, Technical Report DC-PSR-99-05, Department of Computer Science and Engineering, Czech Technical University in Prague, March 1999.
- [Bli97] Blinn, J. F., *Models of light reflection for computer synthesized pictures*, Proc. 4th annual conference on computer graphics and interactive techniques, 1977.
- [Bor11] Borczyk, W., *Wyznaczanie oświetlenia globalnego z wykorzystaniem mapy fotonów*, Rozprawa doktorska, promotor prof. dr hab. inż. Konrad Wojciechowski, Politechnika Śląska, 2011.
- [Bou05] Boulos, S., *Notes on efficient ray tracing*, Courses on - SIGGRAPH '05, Courses: 10, 2005.
- [Cam02] Cammarano, M., Jensen, H. W., *Rendering Techniques*, vol. 28 of ACM International Conference Proceeding Series, Eurographics Association, 2002, s. 135-144.
- [Car13] Cardoso, J., *Crafting 3D Photorealism: Lighting Workflows in 3ds Max, mental ray and V-Ray*, 3DTotal Publishing, 2013, ISBN-10 0956817157, ISBN-13 978-0956817150.
- [Che10] Chen, L.-H., Tsai, T.-C., Chen, Y.-S., *Grouped photon mapping*, The Visual Computer 26(3), 2010, s. 217-226.
- [Chi94] Chiu, K., Shirley, P., *Rendering, Complexity, and Perception*, Fifth EUROGRAPHICS Workshop on Rendering, Darmstadt, Germany, June 13-15, 1994, s. 19-33.
- [Coh85] Cohen, M., Greenberg, D., *The Hemi-Cube: A radiosity solution for complex environments*, Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings) 19(3), 1985, s. 31-40.
- [Coh86] Cohen, M., Greenberg, D. P., Immel, D. S., Brock, P. J., *An efficient radiosity approach for realistic image synthesis*, IEEE Computer Graphics and Applications 6:3 (Mar. 1986), s. 26-35.

-
- [Coh88] Cohen, M., Chen, S. E., Wallace, J. R., Greenberg, D. P., *A progressive refinement approach to fast radiosity image generation*, Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings) 22:4, August 1988, s. 75-84.
- [Coh93] Cohen, M., Wallace, J. R., *Radiosity and realistic image synthesis*, Boston, Wydaw. APProfessional, 1993.
- [Coo84] Cook, R. L., Porter, T., Carpenter, L., *Distributed Ray Tracing*, Computer Graphics, vol. 18, no. 3, 1984, s. 137-145.
- [Cor09] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., *Introduction to algorithms*, Third Edition, MIT Press, 2009.
- [Corn70] Cornsweet, T., N., *Visual Perception*, Academic Press, New York, 1970.
- [Cus09] Cusson, R., Cardoso, J., *Realistic Architectural Visualization with 3ds Max and mental ray*, 2 edition, Focal Press, 2009.
- [ElH08] ElHelw, M. A., Nicolaou, M., Chung, A. J., Yang, G.-Z., Atkins, M. S., *A gaze-based study for investigating the perception of visual realism in simulated scenes*, TAP 5(1), 2008.
- [Fal86] Falk, D. S., Brill, D. R., Stork, D. G., *Seeing The Light: Optics in Nature, Photography, ColourVision, and Holography*, Harper & Row Publishers Inc., New York, 1986.
- [Fle99] Fleming, B., *Advanced 3D Photorealism Techniques*, John Wiley & Sons, 1999.
- [Fol93] Foley, J., van Dam, A., Feiner, S., Hughes, J., Phillips, R., *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1993.
- [Gar06] García, R. J., Ureña, C., Revelles, J., Lastra, M., Montes, R., *Density estimation optimizations for global illumination*, WSCG'2006 Short Communications Proceedings, 2006.
- [Gla84] Glassner, A. S., *Space subdivision for fast ray tracing*, IEEE Computer Graphics and Applications 4(10), 1984, s. 15-22.

- [Gla89] Glassner, A. S., *An Introduction to Ray Tracing*, Morgan Kaufmann, 1989, ISBN 978-0122861604.
- [Gla95] Glassner, A. S., *Principles of digital image sythesis*, Morgan Kaufmann, 1995.
- [Gol71] Goldstein, R. A., Nagel, R., *3-D visual simulation*, Simulation 16(1), 1971, s. 25-31.
- [Gor84] Goral, C., Torrance, K., Greenberg, D., Battaile, B., *Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces*, SIGGRAPH ,84 Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1984.
- [Gou71] Gouraud, H., *Continous Shading of Curved Surfaces*, IEEE Transactions on Computers 20:6, 1971, s. 623-629.
- [Gre06] de Greve, B., *Reflections and Refractions in Ray Tracing*, 13 November, 2006.
- [Guz11a] Guzek, K., Napieralski, P., *Streamed Photon Mapping*, Metody Informatyki Stosowanej, Kwartalnik Komisji Informatyki PAN Oddział w Gdańsku, Nr. 4/2011 (29), Szczecin 2011, s. 67-74, ISSN 1898-5297.
- [Guz11b] Guzek, K., Napieralski, P., *Measurement of Noise in the Monte Carlo Ray Tracing Methods*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 59, No. 1, 2011, s. 15-19, ISSN 0239-7528.
- [Guz12a] Guzek, K., Napieralski, P., *Algorithms and methods for global illumination*, Computer Science in Novel Applications. Human-Centered Interdisciplinary Applications, pod edycją A. Romanowski, D. Sankowski, Lodz University of Technology Press, 2012, s. 87-102, ISBN 978-83-7283-497-3.
- [Guz12b] Guzek, K., Napieralski, P., *System for Developing Photon Mapping Algorithms*, Towards Modern Collaborative Knowledge Sharing Systems Studies in Computational Intelligence, pod edycją P. Lipiński, K. Świrski, Springer, 2012, s. 71-81, ISBN13 9783642274459, ISBN10 3642274455.
- [Hac08] Hachisuka, T., Ogaki, S., Jensen, H. W., *Progressive photon mapping*, ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia Proceedings) 27, 5, Article 130, 2008.

- [Hac09] Hachisuka, T., Jensen, H. W., *Stochastic Progressive Photon Mapping*, ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2009), 2009.
- [Hal03] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Podstawy fizyki. T.4*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003.
- [Hav02] Szirmay-Kalos, L., Havran, V., Balázs, B., Szécsi, L., *On the efficiency of ray-shooting acceleration schemes*, Proceedings of the 18th spring conference on Computer graphics, Budmerice, Slovakia, April 24-27, 2002.
- [Hav05] Havran, V., Bittner, J., Herzog, R., Seidel, H. P., *Ray maps for global illumination*, In: Proc. of Eurographics Symposium on Rendering, 2005, s. 43-54.
- [Hec12] Hecht, E., *Optyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [Hec91] Heckbert, P. S., Winget, J. M., *Finite element methods for global illumination*, Tech. Rep. UCP/CSD 91/643, Computer Science Division (EECS), University of California, Berkeley, July 1991.
- [Her07] Herzog, R., Havran, V., Kinuwaki, S., Myszkowski, K., Seidel, H.-P., *Global illumination using photon ray splatting*, Computer Graphics, Forum 26(3), 2007, s. 503–513.
- [Hey02] Hey, H., Purgathofer, W., *Advanced radiance estimation for photon map global illumination*, Computer Graphics Forum, 21(3), 2002, s. 541–546.
- [Hop97] Hopfinger, M. (red.), *Od fotografii do rzeczywistości wirtualnej*, IBL PAN, 1997.
- [Hor93] Horowitz, E., Sahni, S., Anderson-Freed, S., *Fundamentals of Data Structures in C*, Computer Science Press, 1993.
- [Ing46] Ingarden, R., *O budowie obrazu. Szkic z teorii sztuki*, Rozprawy Wydziału Filozoficznego PAU Vol. LXVII, No.2, Kraków, 1946.
- [Jen01a] Jensen, H. W., *State of the art in Monte Carlo ray tracing for realistic image synthesis*, SIGGRAPH 2001, Course: 29, 2001.
- [Jen01b] Jensen, H. W., *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, AK Peters, 2001, ISBN 1568811470.

- [Jen95a] Jensen, H. W., Christensen, N. J., *Photon maps in Bidirectional Monte Carlo Ray Tracing of Complex Objects*, Computers & Graphics 19(2), 1995, s. 215-224.
- [Jen95b] Jensen, H. W., *Importance driven path tracing using the photon map*, Rendering Techniques '95 (Proceedings of the Sixth Eurographics Workshop on Rendering), Springer Verlag, 1995, s. 326-335.
- [Jen95c] Jensen, H. W., Christensen, N. J., *Efficiently Rendering Shadows using the Photon Maps*, In Proceedings of Compugraphics '95, Alvor, December 1995, s. 285-291.
- [Jen96] Jensen, H. W., *Global illumination using photon maps*, Rendering Techniques '96 (Proceedings of the Seventh Eurographics Workshop on Rendering), Springer Verlag, 1996, s. 21-30.
- [Kaj86] Kajiya, J. T., *The Rendering Equation*, Computer Graphics, Vol.20, No 4, August 1986.
- [Kay86] Kay, T. L., Kajiya, J. T., *Ray tracing complex scenes*, Computer Graphics (proc. SIGGRAPH '86), 20(4), 1986, s. 269-278.
- [Kel00] Keller, A., Wald, I., *Efficient Importance Sampling Techniques for the Photon Map*, In Proceedings of Vision Modelling and Visualisation, Saarbruecken, Germany, 2000, s. 271-279.
- [Kur79] Kuryluk, E., *Hiperrealizm - Nowy Realizm*, Wydawnictwo AF, 1979.
- [Laf93] Lafortune, E.P., Willems, Y.D., *Bi-Directional Path Tracing*, Proceedings of Compugraphics '93, Alvor, Portugal, December 1993, s. 145-153.
- [Laf94] Lafortune, E.P., Willems, Y.D., *Using the Modified Phong Reflectance Model for Physically Based Rendering*, Report CW197, Department of Computer Science, K.U.Leuven, November 1994.
- [LaM95] LaMothe, A., *Black Art of 3D Game Programming*, 1995, ISBN 1-57169-0042.

- [Las02] Lastra, M., Urena, C., Revelles, J., Monyes, R., *A particle-path based method for Monte Carlo density estimation*, In: Proc. of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, 2002, s. 33-40.
- [Lev94] Levine, G., Parkinson, S., *Experimental Methods in Psychology*, Hillsdale, New Jersey, 1994.
- [McN98] McNamara, A., Chalmers, A., Troscianko, T., Reinhard, E., *Fidelity of graphics reconstructions: A psychophysical investigation*, In Proceedings of the 9th Eurographics Rendering Workshop, Springer Verlag, June 1998, s. 237-246.
- [McQ03] McQuarrie, D. A., *Mathematical Methods for Scientists and Engineers*, University Science Books, 2003, ISBN 978-1-891389-24-5.
- [Mł098] Młodkowski, J., *Aktywność wizualna człowieka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- [Mue04] Mueller, P., Vereenoghe, T., Vergauwen, M., Van Gool, L., Waelkens, M., *Photo-Realistic and Detailed 3D Modeling: The Antonine Nymphaeum at Sagalassos (Turkey)*, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA2004): Beyond the artifact - Digital interpretation of the past, April 2004.
- [Mur13] Murdock, K. L., *Autodesk 3ds Max 2014 Bible*, 1 edition, Wiley, 2013, ISBN-10 1118755073, ISBN-13 978-1118755075.
- [Mys97] Myszkowski, K., *Lighting reconstruction using fast and adaptive density estimation techniques*, Rendering Techniques '97 (Proceedings of the Eighth Eurographics Workshop on Rendering), Springer Verlag, 1997, s. 321-326.
- [Nis85] Nishita, T., Okamura, I., Nakamae, E., *Shading models for point and linear sources*, ACM Transactions on Graphics 4(2), 1985, s. 124-146.
- [Pet98] Peter, I., Pietrek, G., *Importance driven Construction of Photon Maps*, In Rendering Techniques '98, 1998, s. 269-280.

- [Pha10] Pharr, M., Humphreys, G., *Physically Based Rendering*, Second Edition: From Theory To Implementation, Morgan Kaufmann, 2010, ISBN 0123750792.
- [Pho75] Phong, B.-T., *Illumination for computer generated images*, Comm. ACM 18, 6 June 1975, s. 311-317.
- [Rad02] Rademacher, P. M., *Measuring the Perceived Visual Realism of Images*, PhD. thesis, Chapel Hill, 2002.
- [Rom13] Roman, A., *The third and the seventh: from bits to the lens*, The Third & The Seventh S.L., 1st Edition, September 2013.
- [Rus87] Rushmeier, H. E., Torrance, K. E., *The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium*, Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings) 21:4, July 1987, s. 293–302.
- [Sed92] Sedgewick, R., *Algorithms in C++*, Addison-Wesley, 1992.
- [Sei05] Havran, V., Herzog, R., Seidel, H.-P., *Fast final gathering via reverse photon mapping*, Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2005) 24/3, September, 2005.
- [Shi03] Shirley, P., Morley, K. R., *Realistic Ray Tracing*, 2nd edition, AK Peters, 2003, ISBN 978-1568811987.
- [Shi09] Shirley, P., Ashikhmin, M., Marschner, S., *Fundamentals of Computer Graphics*, A K Peters/CRC Press; 3rd edition, 2009, ISBN-10 1568814690, ISBN-13 978-1568814698.
- [Sie81] Siegel, R., Howell, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC, 1981.
- [Sil86] Silverman, B. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall, London, 1986.
- [Smi07] Smith, F. G., King, T. A., Wilkins, D., *Optics and Photonics: An Introduction*, Second Edition, Wiley Publishing, 2007, ISBN. 9780470017838.

- [Ste07] van der Steen, J., *Rendering with mental ray and 3ds Max*, Focal Press, 2007.
- [Str90] Strauss, P. S., *A Realistic Lighting Model for Computer Animators*, IEEE Computer Graphics and Application, Vol. 10, No. 6, 1990, s. 56-64.
- [Suf07] Suffern, K., *Ray Tracing from the Ground Up*, AK Peters, 2007, ISBN 978-1-56881-272-4.
- [Sun92] Sung, K., Shirley, P., *Ray tracing with the bsp tree*, In: Graphics Gems III, Academic Press, 1992.
- [Suy00] Suykens, F., Willems, Y., *Density Control for Photon Maps*, 11th Eurographics Workshop on Rendering, Brno, Czech Republic, June 26-28, 2000.
- [Suy02] Suykens, F., *On robust Monte Carlo algorithms for multi-pass global illumination*, PhD thesis, Department of Computer Science, K.U.Leuven, Leuven, Belgium, September 2002, ISBN 905-682-366-3, Willems, Y., (supervisor).
- [Szc13] Szrajber, R., *Wirtualna rekonstrukcja jako narzędzie w procesie przywracania utraconego dziedzictwa na przykładzie wybranych zabytków Łodzi i jej regionu*, Rozprawa doktorska, promotor dr. hab. inż. arch. Marek Pabich, prof. PŁ, Instytut Architektury PŁ, 2013.
- [Tob06] Tobler, R. F., Maierhofer, S., *Improved illumination estimation for photon maps in architectural scenes*, In: Proc. of WSCG, 2006, s. 257-262.
- [Tom07] Tomczak, T., *Akceleracja sprzętowa działań arytmetycznych w algorytmach oświetlenia globalnego*, Rozprawa doktorska, promotor dr. hab. inż. Janusz Biernat, prof. PW, Politechnika Wrocławska, 2007.
- [Vea94] Veach, E., Guibas, L., *Bidirectional estimators for light transport*, Fifth Eurographics Workshop on Rendering, Eurographics, 1994, s. 147-162.
- [Vea95] Veach, E., Guibas, L., *Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering*, SIGGRAPH 95 Proceedings, Addison-Wesley, August 1995, s. 419-428.

- [Vea97] Veach, E., Guibas, L., *Metropolis Light Transport*, SIGGRAPH 97 Proceedings, Addison-Wesley, August 1997, s. 65-76.
- [Wal01] Wald, I., Slusallek, P., *State-of-the-art in interactive raytracing*, EUROGRAPHICS 2001, State of the Art Reports, 2001, s. 21-42.
- [Wal04] Wald, I., *Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination*, PhD thesis, Saarland University, 2004.
- [War91] Ward, G., *Real pixels*, In Graphics Gems II, James Arvo (ed.), Academic Press, 1991, s. 80-83.
- [Whi80] Whitted, T., *An improved illumination model for shaded display*, Communications of the ACM 23(6), 1980, s. 343- 349.
- [Won05] Wong, K. W., Wang, W., *Adaptive density estimation using an orthogonal series for global illumination*, Computers & Graphics, 29(5), October 2005, s. 738-755.
- [Wyn00] Wynn, C., *An Introduction to BRDF-Based Lighting*, NVIDIA Corporation, 2000.

10. Spis rysunków, tabel, pseudokodów i algorytmów

10.1 Spis rysunków

- Rys. 1.1. Fotorealistyczna rekonstrukcja parowozu PM36-1. © Rafał Jędrzejewski, 2013. 9
- Rys. 1.2. Wirtualna rekonstrukcja wnętrza synagogi w Brzezinach zaprojektowanej przez Ignacego Markiewicza, spalonej w 1939 roku. © Maciej Białek, 2013. 9
- Rys. 1.3. Oświetlenie lokalne (po lewej) uniemożliwia dostrzeżenie obiektów schowanych w cieniu. Globalne oświetlenie (po prawej) sprawia, że obiekty będące w cieniu są również oświetlone za pomocą promieni odbitych od innych powierzchni, na obszarach sąsiadujących powierzchni zachodzi przenikanie kolorów, widoczne są również efekty kaustyczne (ilustracja autora). 11
- Rys. 2.1. Spektrum fali elektromagnetycznej dla światła widzialnego [Hal03]. . 16
- Rys. 2.2. Schemat odbicia zwierciadlanego promieni (ilustracja autora). . . . 18
- Rys. 2.3. Schematyczny rozkład odbicia promieni światła padających na matową powierzchnię w skali mikroskopowej (ilustracja autora). 18
- Rys. 2.4. Schemat prawa Lamberta (ilustracja autora) 19

Rys. 2.5.	Schemat załamania wiązki światła padającej na płaską powierzchnię rozgraniczającą dwa ośrodki (ilustracja autora)...	20
Rys. 2.6.	Schemat powstawania efektów kausytnych: a) diakaustyka, b) katakaustyka (ilustracja autora)...	21
Rys. 2.7.	Luminancja energetyczna (ilustracja autora)...	23
Rys. 2.8.	Podstawowe modele źródeł światła: kolejno od lewej: punktowe, reflektorowe, kierunkowe, powierzchniowe (ilustracja autora)...	25
Rys. 2.9.	Schemat interakcji światła i materii. Światło padające (P) na powierzchnię ośrodka 2 w punkcie S ulega absorpcji (A), odbiciu (O) i transmisji (T) (ilustracja autora)...	26
Rys. 2.10.	Ilustracja funkcji BRDF (ilustracja autora)...	27
Rys. 2.11.	Ilustracja modelu oświetlenia Phonga (ilustracja autora)...	28
Rys. 3.1.	Schemat rzutowania promienia z pozycji wirtualnej kamery przez piksel obrazu, który przecina bryłę znajdującą się w scenie (ilustracja autora)...	32
Rys. 3.2.	Schemat rekursywnego śledzenia promieni: promień 1 trafia w powierzchnię matową, promień 2 w sferę o właściwościach refrakcyjnych, promień 3 w sferę odbijającą zwierciadlanie; liniami przerywanymi zaznaczono promienie cienia (ilustracja autora)...	33
Rys. 3.3.	Obraz otrzymany rekursywną metodą śledzenia promieni [Whi80]...	36
Rys. 3.4.	Schemat rozproszonego śledzenia promieni: powierzchnie płaskie rozpraszają światło, mniejsza sfera odbija zwierciadlanie, większa sfera ma właściwości refrakcyjne; linią przerywaną oznaczono promienie cienia (ilustracja autora)...	37
Rys. 3.5.	Obraz wyrenderowany za pomocą rozproszonego śledzenia promieni z widocznym efektem rozmycia ruchu [Coo84]...	38
Rys. 3.6.	Ilustracja równania renderingu (3.2) (ilustracja autora)...	39
Rys. 3.7.	Ilustracja równania renderingu (3.4) (ilustracja autora)...	40
Rys. 3.8.	Schemat śledzenia ścieżek: dwie ścieżki wyprowadzone dla jednego piksela obrazu oznaczono linią ciągłą, linią przerywaną oznaczono promienie cienia prowadzone z punktów ścieżki do źródła światła, powierzchnie płaskie są rozpraszające, sfera odbija zwierciadlanie (ilustracja autora)...	41

Rys. 3.9.	Scena testowa wyrenderowa za pomocą śledzenia ścieżek z widocznym efektem kaustycznym generowanym przez zielone kule oraz efektem przenikania kolorów sąsiadujących powierzchni [Kaj86].	42
Rys. 3.10.	Schemat dwukierunkowego śledzenia ścieżek. Linia ciągłą oznaczono ścieżkę wyprowadzoną z kamery, linią kreskowaną oznaczono ścieżkę wyprowadzoną ze źródła światła, linią kropkowaną oznaczono połączenia obu ścieżek (ilustracja autora).	43
Rys. 3.11.	Obrazy wyrenderowane w tym samym czasie za pomocą dwukierunkowego śledzenia ścieżek dla 25 próbek na piksel (po lewej) oraz za pomocą śledzenia ścieżek dla 56 próbek na piksel (po prawej) [Vea95]. . .	44
Rys. 3.12.	Schemat mutacji ścieżki w metodzie Metropolis Light Transport. Linia ciągłą oznaczono pierwotny przebieg ścieżki, linią przerywaną oznaczono ścieżkę zmutowaną [Guz12a].	44
Rys. 3.13.	Obrazy wyrenderowane w tym samym czasie za pomocą dwukierunkowego śledzenia ścieżek dla 40 ścieżek na piksel (a) oraz za pomocą Metropolis Light Transport dla średnio 250 mutacji ścieżki na piksel (b) [Vea97].	45
Rys. 3.14.	Podział geometrii sceny na płaty [Ash94a].	46
Rys. 3.15.	Ilustracja współczynnika sprzężenia pomiędzy płatami (ilustracja własna).	47
Rys. 3.16.	a) fotografia rzeczywistego modelu sceny testowej (Cornell Box) b) rendering wirtualnego modelu za pomocą algorytmu radiosity (49 płatów na ścianę), cieniowanie stałą wartością, c) rendering wirtualnego modelu za pomocą algorytmu radiosity (49 płatów na ścianę), cieniowanie interpolowane [Gor84].	49
Rys. 3.17.	Kolejne iteracje metody progresywnego polepszania, od lewej: 1, 2, 3 i 16. © Hugo Elias.	49
Rys. 3.18.	Emisja i propagacja fotonów ze źródła światła (a) i rendering (b) (ilustracja autora).	50
Rys. 3.19.	Mapa projekcji: kolor biały oznacza piksele, przez które przechodzą promienie emisji fotonów ze źródła światła, które trafiają w obiekt geometryczny sceny; kolor czarny oznacza piksele, przez które przechodzą promienie emisji fotonów ze źródła światła, które nie trafiają w geometrię sceny (ilustracja autora).	53

Rys. 3.20.	Schemat przykładowych ścieżek fotonów wewnątrz Cornell Box ze sferą lustrzaną (po lewej) oraz refrakcyjną (po prawej): (a) dwa odbicia dyfuzyjne i absorpcja, (b) odbicie zwierciadlane a następnie dwa odbicia dyfuzyjne, (c) dwie refrakcje i absorpcja (ilustracja autora)..	56
Rys. 3.21.	Przykładowy obraz uzyskany za pomocą klasycznej metody mapowania fotonowego (ilustracja autora)..	61
Rys. 4.1.	Podział przestrzeni (po lewej) otrzymany na podstawie drzewa kd (po prawej) dla przykładowego zbioru sześciu punktów w przestrzeni dwuwymiarowej (ilustracja autora)..	65
Rys. 4.2.	Tablica 12 fotonów zorganizowanych w strukturę kopca (ilustracja autora)..	67
Rys. 4.3.	Schemat błędów powstających na skutek niedokładnego wyznaczania gęstości energii fotonów blisko krawędzi obiektów (a) oraz na powierzchniach wypukłych (b) (ilustracja autora)..	71
Rys. 4.4.	Artefakty w postaci wycieków cieni na stykach krawędzi (a) oraz ich korekcja za pomocą adaptacyjnego przybliżenia powierzchni [Las02].. . . .	71
Rys. 4.5.	Przybliżenie powierzchni zbierającej fotony za pomocą ośmiu ośmiokątów [Tob06].	72
Rys. 4.6.	Błędne wyznaczenie natężenia oświetlenia pośredniego na relatywnie małych odizolowanych obiektach [Las02].. . . .	72
Rys. 4.7.	Błędy rozświetlenia powstające w wyniku zebrania fotonów należących do różnych geometrii [Las02].	73
Rys. 4.8.	Schemat mapowania promieni [Guz12a].	74
Rys. 4.9.	Artefakty powstające podczas renderowania wklęsłych fragmentów siatki (a), obraz skorygowany za pomocą sprawdzenia podwójnego przecięcia (b) [Las02].. . . .	74
Rys. 4.10.	Wyznaczanie promieni dla wklęsłych fragmentów siatki [Las02].. . . .	75
Rys. 4.11.	Odcięcie obszaru dysku pozbawionego promieni [Las02].. . . .	75
Rys. 4.12.	Schemat blokowy algorytmu grupowego mapowania fotonowego (ilustracja autora na podstawie [Che10]).. . . .	76
Rys. 4.13.	Emisja importonów z pozycji wirtualnej kamery (a) poprzedzająca emisję fotonów ze źródła światła w kierunkach nagromadzenia importonów (b) (ilustracja autora)..	78

- Rys. 4.14. Schemat dwóch etapów progresywnego mapowania fotonowego: a) przebieg śledzenia promieni, b) przebieg śledzenia fotonów [Guz12a]. 79
- Rys. 4.15. Schemat trzech etapów algorytmu stochastycznego progresywnego mapowania fotonowego: a) wygenerowanie początkowych punktów trafienia dla poszczególnych pikseli, b) emisja i propagacja fotonów i uaktualnienie obliczonych wartości koloru pikseli na podstawie energii fotonów, które trafiły w otoczenie punktów, c) przebieg rozproszonego śledzenia promieni modyfikujący pozycję punktów trafienia w obrębie ustalonego otoczenia (ilustracja autora). 79
- Rys. 4.16. Nałożenie kolejnych klatek animacji obiektu refrakcyjnego uzyskanych za pomocą mapowania fotonowego w czasie z widocznym efektem kaustycznym (a), połączona sekwencja klatek (b) [Cam02]. 80
- Rys. 4.17. Wyszukiwanie fotonów w przestrzeni w przypadku statycznej sceny (a) oraz w wybranym przedziale czasu (b) [Cam02]. 81
- Rys. 5.1. Emisja jednego fotonu wiodącego (F) ze źródła światła [Guz11a]. 84
- Rys. 5.2. Emisja strumienia fotonów o promieniu (r_s), wyznaczonego przez foton wiodący (F) wraz z fotonami stowarzyszonymi ($F1, F2, F3$) [Guz11a]. 85
- Rys. 5.3. Nowy punkt przecięcia (F') fotonu wiodącego z geometrią sceny po odbiciu od powierzchni dyfuzyjnej [Guz11a]. 87
- Rys. 5.4. Nowe kierunki propagacji fotonów stowarzyszonych w strumieniu po odbiciu od powierzchni dyfuzyjnej [Guz11a]. 87
- Rys. 5.5. Tłumienie fotonu ($F1'$) należącego do strumienia wyznaczonego przez foton wiodący (F') [Guz11a]. 88
- Rys. 5.6. Strumień wyznaczone przez fotony wiodące ($F1$) i ($F2$), znalezione wokół punktu uderzenia (x) w promieniu wyszukiwania (R) [Guz11a] 90
- Rys. 5.7. Schemat blokowy algorytmu strumieniowego mapowania fotonowego (ilustracja autora). 91
- Rys. 5.8. Obraz wygenerowany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego, dla 10000 strumieni po 100 fotonów stowarzyszonych, bez dodatkowych fotonów kaustycznych, promień szerokości strumienia równy 5 (1/4 szerokości sceny), promień wyszukiwania fotonów w mapie fotonowej równy 3,5 liczba wyszukiwanych najbliższych sąsiadów 100, dopuszczalna liczba odbić strumienia równa 4. Światło powierzchniowe składające się z 49 światel punktowych. 93

Rys. 6.1.	Schemat systemu renderującego umożliwiającego rendering metodą strumieniowego mapowania fotonowego (ilustracja autora).	96
Rys. 6.2	Okno aplikacji renderującej.	98
Rys. 7.1.	Pusta scena testowa (Cornell Box) z oświetleniem bezpośrednim pochodzącym od powierzchniowego źródła światła.	106
Rys. 7.2.	Dyfuzyjne sceny testowe z oświetleniem bezpośrednim: sześcian i sfera (po lewej) oraz Utah Teapot (po prawej)..	107
Rys. 7.3.	Po lewej scena do testowania efektów diakaustycznych z refrakcyjną kulą, po prawej scena do testowania efektów katakaustycznych z zakrzywioną powierzchnią lustrzaną, oświetlenie bezpośrednie.	107
Rys. 7.4.	Po lewej złożony model geometryczny (Stanford Bunny), po prawej nagromadzenie niewielkich modeli geometrycznych w bliskich odległościach; oświetlenie bezpośrednie..	108
Rys. 7.5.	Rozkład fotonów dla pustej sceny testowej w zależności od szerokości strumienia fotonów: po lewej $n_s=1$, $n_{fs}=1$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=3$, $r_s=0.5$ j.s., $m_r=4$; po prawej $n_s=1$, $n_{fs}=1$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=3$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$.	109
Rys. 7.6.	Rozkład fotonów dla pustej sceny testowej: $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$.	109
Rys. 7.7.	Wynik obliczeń globalnego oświetlenia uzyskany dla sceny dyfuzyjnej z sześcianem i sferą: a) rozkład fotonów w scenie, b) wyrenderowana składowa oświetlenia pośredniego, c) scena z samym oświetleniem bezpośrednim, d) scena z oświetleniem bezpośrednim i pośrednim; $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$.	110
Rys. 7.8.	Wyniki obliczeń globalnego oświetlenia w zależności od liczby wyemitowanych strumieni fotonów, uzyskane dla sceny dyfuzyjnej z czajnikiem: po lewej $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$; po prawej $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$..	111
Rys. 7.9.	Wynik obliczeń globalnego oświetlenia uzyskany dla sceny dyfuzyjnej z modelem Stanford Bunny: $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$.	112
Rys. 7.10.	Wyniki obliczeń globalnego oświetlenia w zależności od promienia szerokości strumienia, uzyskane dla sceny dyfuzyjnej z małymi obiektami w niewielkich odległościach: po lewej $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$; po prawej $n_s=1$, $n_{fs}=1000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=0.1$ j.s., $m_r=4$.	113

- Rys. 7.11. Trójwymiarowa przestrzeń parametrów metody strumieniowego mapowania fotonowego; zaznaczono punkty dla których wygenerowane zostały obrazy do testów percepcyjnych. 114
- Rys. 7.12. Plamy barwne wynikające z niedostatecznej liczby wyemitowanych strumieni $n_{fs}=500$ przy zbyt małym promieniu szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. w stosunku do wymiarów sceny. 115
- Rys. 7.13. Zestawienie obrazów testowych analizowanej przestrzeni parametrów dla stałej szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. Obrazy w wierszach różnią się liczbą strumieni kolejno od lewej: 1000, 5000, 10000. Obrazy w kolumnach różnią się liczbą fotonów stowarzyszonych, kolejno od dołu: 10, 50, 100. 116
- Rys. 7.14. Ta sama scena testowa dyfuzyjna z oświetleniem bezpośrednim bez efektu przenikania kolorów (po lewej) i z oświetleniem globalnym z widocznym efektem przenikania kolorów (po prawej) uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$ 117
- Rys. 7.15. Efekt diakaustyczny uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$. 118
- Rys. 7.16. Efekt katakastyczny uzyskany za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=10$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$ 118
- Rys. 7.17. Efekt miękkich cieni widocznych w narożnikach sceny (po lewej) oraz pod sferą (po prawej) uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$. . . 119
- Rys. 7.18. Cień uzyskany przy oświetleniu bezpośrednim sceny (po lewej) i cień uzyskany przy globalnym oświetleniu sceny za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=2.5$ j.s., $m_r=4$ 119
- Rys. 7.19. Obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 1000000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla $n_s=1$, $n_{fs}=10000$, $n_{fc}=0$, $n_{fa}=100$, $r_s=5$ j.s., $m_r=4$ (po prawej). 120
- Rys. 7.20. Po lewej efekt diakaustyczny uzyskany metodą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 wyemitowanych strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych i promieniu szerokości strumienia równym 5 j.s., czas renderingu 90940 ms. Pośrodku efekt diakaustyczny wygenerowany za

- pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów, czas renderingu 95421 ms. Po prawej efekt diakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów globalnych oraz dodatkowo 100000 fotonów kaustycznych, czas renderingu 105482 ms. 121
- Rys. 7.21. Po lewej efekt katakaustyczny uzyskany metodą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 wyemitowanych strumieni po 10 fotonów stowarzyszonych i promieniu szerokości strumienia równym 5 j.s., czas renderingu 101103 ms. Pośrodku efekt katakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów, czas renderingu 101794 ms. Po prawej efekt katakaustyczny wygenerowany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów globalnych oraz dodatkowo 100000 fotonów kaustycznych, czas renderingu 111232 ms. 121
- Rys. 7.22. Ekran aplikacji testującej.. 123
- Rys. 7.23. Pierwsza para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 1000000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 100 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej).. 124
- Rys. 7.24. Druga para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 500000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 50 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej). 124
- Rys. 7.25. Trzecia para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 250000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 5000 strumieni fotonów po 50 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej). . . 125
- Rys. 7.26. Czwarta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 100000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 10000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 2,5 j.s. (po prawej). . . 125
- Rys. 7.27. Piąta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 50000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 5000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej). 126
- Rys. 7.28. Szósta para obrazów: obraz uzyskany za pomocą mapowania fotonowego dla 10000 fotonów (po lewej) oraz obraz uzyskany za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego dla 1000 strumieni fotonów po 10 fotonów i promienia strumienia równego 5 j.s. (po prawej). 126

- Rys. 7.29. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów w zależności od całkowitej liczby wyemitowanych fotonów. 128
- Rys. 7.30. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów testowych w zależności od liczby wemitowanych strumieni z uwzględnieniem szerokości strumieni. 129
- Rys. 7.31. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadratywskali odcieniszarości)w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 0,1 j.s.. . . 129
- Rys. 7.32. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadratywskali odcieniszarości)w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 2,5 j.s.. . . 130
- Rys. 7.33. Wykres przedstawiający średnie oceny obrazów (reprezentowanych przez kwadratywskali odcieniszarości)w zależności od proporcji pomiędzy liczbą wyemitowanych strumieni, a liczbą fotonów stowarzyszonych w strumieniach, dla promienia szerokości strumienia równego 5 j.s.. . . 130
- Rys. 7.34. Wykres przedstawiający preferowany przez obserwatorów obraz w zależności od liczby wyemitowanych fotonów. 132

10.2 Spis tabel

Tabela 2.1.	Bezwzględne współczynniki załamania światła dla wybranych ośrodków optycznych (na podstawie [Hal03]).	21
Tabela 2.2.	Zestawienie wielkości radiometrycznych i fotometrycznych.	23
Tabela 5.1.	Zestawienie etapów klasycznego mapowania fotonowego i strumieniowego mapowania fotonowego.	92
Tabela 7.1.	Średnia ocena (w skali 1÷5) obrazów testowych wygenerowanych za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego w zależności od wartości parametrów metody.	127
Tabela 7.2.	Średnia ocena (z zakresu 1÷5) obrazów testowych wygenerowanych za pomocą metody strumieniowego mapowania fotonowego w zależności od całkowitej liczby wyemitowanych fotonów.. . . .	128
Tabela 7.3.	Wyniki testu percepcyjnego porównującego standardowe mapowanie fotonowe i strumieniowe mapowanie fotonowe; pm - mapowanie fotonowe, spm - strumieniowe mapowanie fotonowe.	131

10.3 Spis pseudokodów

Pseudokod 3.1. Emisja fotonów z punkowego źródła światła.	51
Pseudokod 3.2. Realizacja mechanizmu rosyjskiej ruletki.	55
Pseudokod 4.1. Balansowanie drzewa kd	66
Pseudokod 4.2. Przeszukiwanie mapy fotonowej.	68
Pseudokod 5.1. Struktura fotonu oraz struktura strumienia fotonów.	89
Pseudokod 6.1. Rendering za pomocą strumieniowego mapowania fotonowego. .	99
Pseudokod 6.2. Generowanie mapy strumieni.	100
Pseudokod 6.3. Propagacja fotonu w scenie.	101

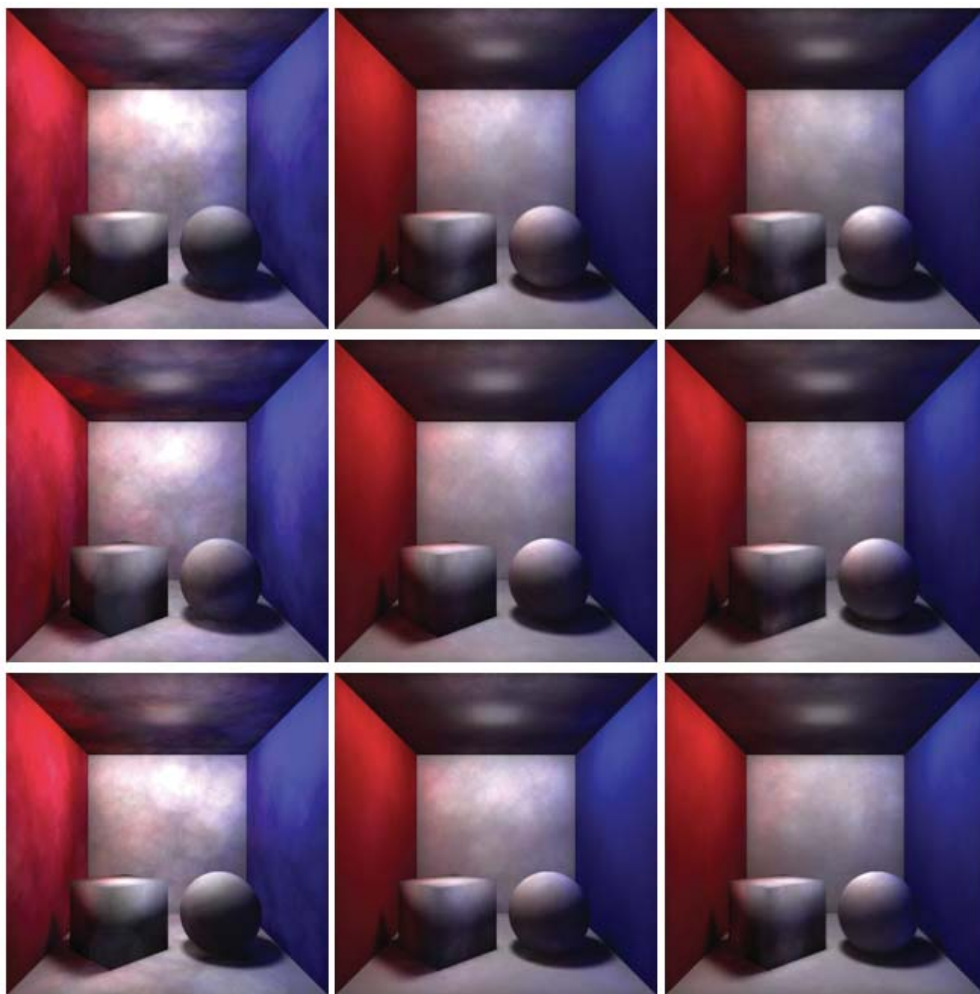
10.4 Spis algorytmów

Algorytm 3.1. Rekursywne śledzenie promieni.	34
Algorytm 3.2. Rendering obrazu za pomocą metody energetycznej.	47
Algorytm 4.1. Dodawanie nowego fotonu do struktury kopca.	70
Algorytm 4.2. Usuwanie najodleglejszego fotonu ze struktury kopca.	70
Algorytm 5.1. Propagacja strumienia fotonów.	85

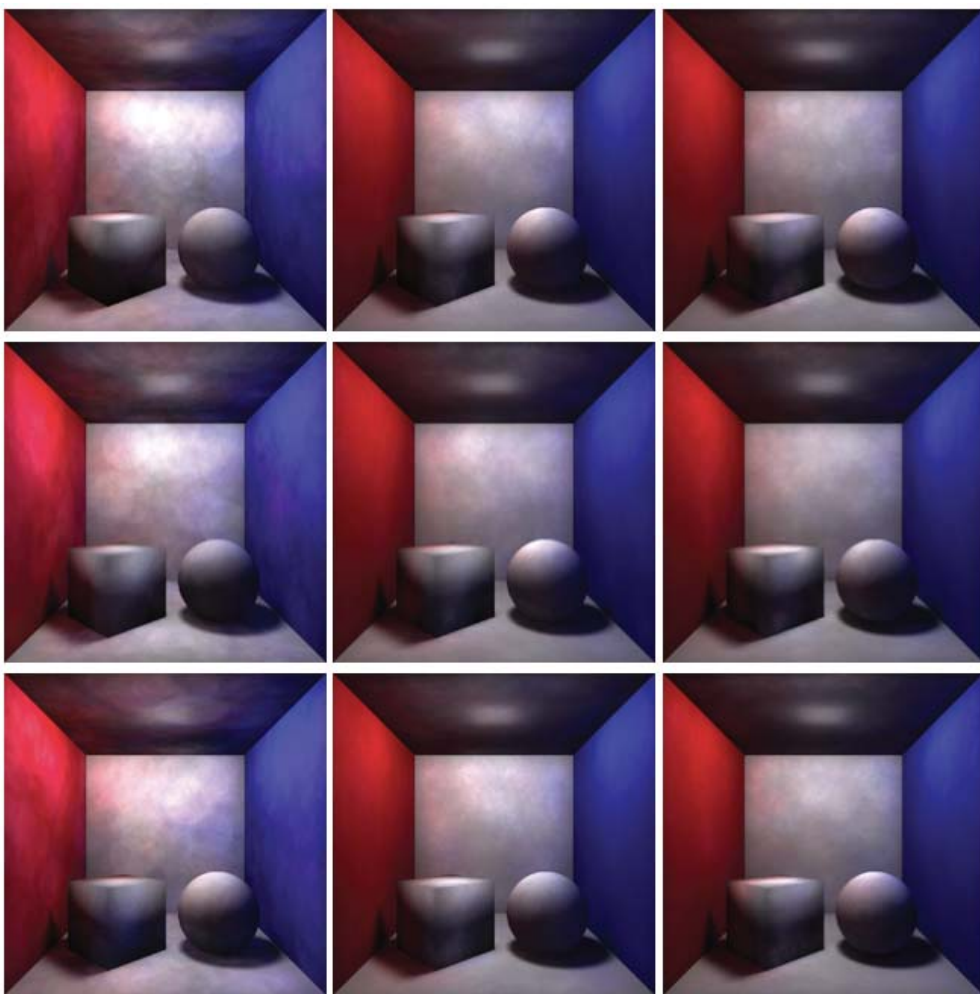
11. Aneks

11.1. Renderingi testowe

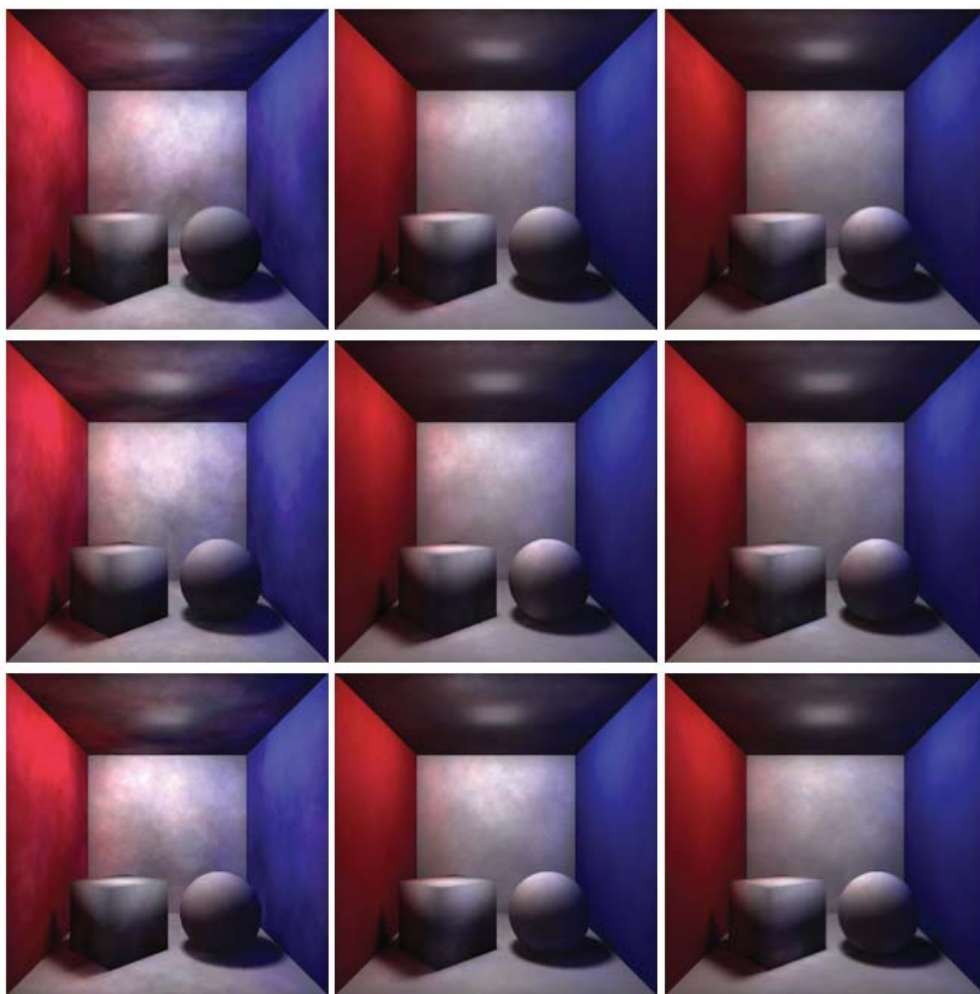
Zestawienie obrazów testowych analizowanej przestrzeni parametrów dla stałej szerokości strumienia $r_s=0.1$ j.s. Obrazy w wierszach różnią się liczbą strumieni kolejno od lewej: 1000, 5000, 10000. Obrazy w kolumnach różnią się liczbą fotonów stowarzyszonych, kolejno od dołu: 10, 50, 100.



Zestawienie obrazów testowych analizowanej przestrzeni parametrów dla stałej szerokości strumienia $r_s=2.5$ j.s. Obrazy w wierszach różnią się liczbą strumieni kolejno od lewej: 1000, 5000, 10000. Obrazy w kolumnach różnią się liczbą fotonów stowarzyszonych, kolejno od dołu: 10, 50, 100.



Zestawienie obrazów testowych analizowanej przestrzeni parametrów dla stałej szerokości strumienia $r_s=5$ j.s. Obrazy w wierszach różnią się liczbą strumieni kolejno od lewej: 1000, 5000, 10000. Obrazy w kolumnach różnią się liczbą fotonów stowarzyszonych, kolejno od dołu: 10, 50, 100.



11.2. Formularze testów percepcyjnych

TEST 1

.....
(Imię i nazwisko uczestnika badania)

.....
(data)

Oświadczenie

Zdaję sobie sprawę że moje dane personalne nie zostaną ujawnione, a zebrane informacje pozostaną poufne. Wyrażam zgodę na ujawnienie zebranych informacji osobom uczestniczącym w prowadzeniu badania. Stwierdzam, że nie będę sprzeciwiać się wykorzystaniu wyników badania w celach naukowych. Miałam / em sposobność zadawania pytań i uzyskałam / em zadowalające odpowiedzi. Mój podpis na niniejszym formularzu został złożony dobrowolnie. Zostałam / em poinformowany, że mogę odmówić zgody na udział w badaniach lub cofnąć ją w każdej chwili, także podczas wykonywania badań, bez jakichkolwiek konsekwencji. Wyrażam zgodę na przetwarzanie danych osobowych w związku z prowadzonym programem badań.

.....
/podpis uczestnika badania/

.....
/podpis prowadzącego badanie/

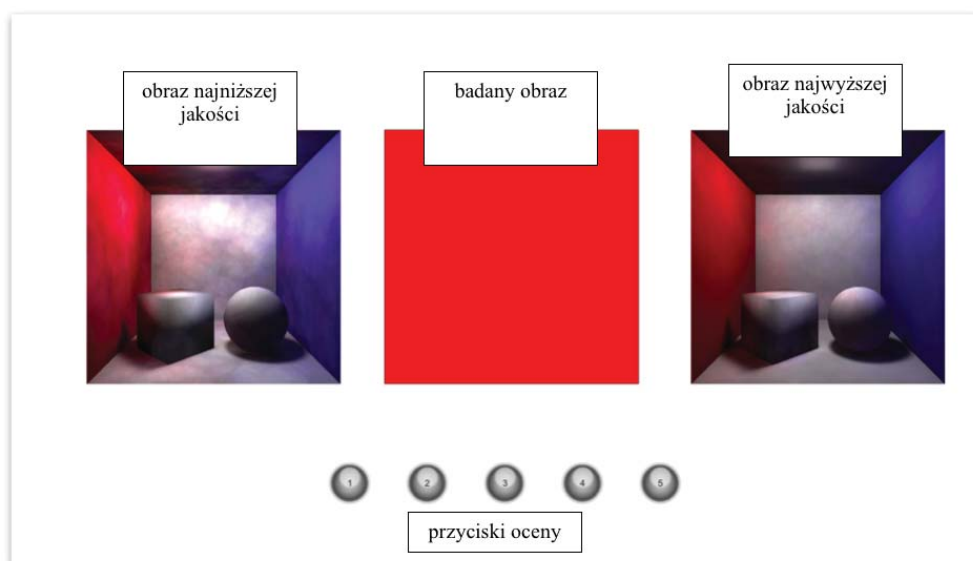
Opis badania

Zapraszamy do wzięcia udziału w badaniu dotyczącym oceny fotorealizmu obrazów generowanych komputerowo.

Na ekranie wyświetlane są trzy obrazy:

- lewy jest obrazem o najniższej jakości,
- środkowy jest obrazem ocenianym,
- prawy obraz jest najlepszej jakości.

Obrazy środkowe wygenerowane zostały w losowej kolejności ze zmiennymi parametrami renderingu, które mają bezpośredni wpływ na ich jakość. Proszę o ocenę każdego z obrazów środkowych w skali 1-5, gdzie ocena 1 oznacza obraz najgorszej jakości (zbliżony do lewego obrazu), ocena 5 to obraz najlepszej jakości (zbliżony do prawego obrazu). Oceny proszę zaznaczać klikając w odpowiednie przyciski na ekranie. Udzielenie odpowiedzi skutkuje wgraniem kolejnego obrazu. Po zakończeniu badania użytkownik poproszony zostanie o zapis do pliku, proszę nazwać plik numerem przyznanym przed badaniem.



TEST 2

.....
(Imię i nazwisko uczestnika badania)

.....
(data)

Oświadczenie

Zdaję sobie sprawę że moje dane personalne nie zostaną ujawnione, a zebrane informacje pozostaną poufne. Wyrażam zgodę na ujawnienie zebranych informacji osobom uczestniczącym w prowadzeniu badania. Stwierdzam, że nie będę sprzeciwiać się wykorzystaniu wyników badania w celach naukowych. Miałam / em sposobność zadawania pytań i uzyskałam / em zadowalające odpowiedzi. Mój podpis na niniejszym formularzu został złożony dobrowolnie. Zostałam / em poinformowany, że mogę odmówić zgody na udział w badaniach lub cofnąć ją w każdej chwili, także podczas wykonywania badań, bez jakichkolwiek konsekwencji. Wyrażam zgodę na przetwarzanie danych osobowych w związku z prowadzonym programem badań.

.....
/podpis uczestnika badania/

.....
/podpis prowadzącego badanie/

Opis badania

Zapraszamy do wzięcia udziału w badaniu dotyczącym oceny fotorealizmu obrazów generowanych komputerowo. Na ekranie wyświetlane są pary obrazów. Dla każdej pary obrazów oznaczonej kolejnym numerem proszę wskazać, który obraz (lewy czy prawy) jest lepszej jakości.

Formularz odpowiedzi

Numer pary obrazów	Lewy	Prawy
1		
2		
3		
4		
5		
6		

